



SKRIPSI – ME-141501

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA
MENGUNAKAN POWER ELECTRONIC CONVERTER
DENGAN KONTROLER JARINGAN SARAF TIRUAN**

Moh Ilham Akbar Arrizqo
NRP 4215 105 003

Dosen Pembimbing
Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - ME-141501

**SPEED CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR
USING POWER ELECTRONIC CONVERTER WITH
NEURAL NETWORK CONTROLLER**

Moh Ilham Akbar Arrizqo
NRP 4215 105 003

Supervisor
Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc.

Department of Marine Engineering
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN POWER ELECTRONIC CONVERTER DENGAN KONTROL JARINGAN SARAF TIRUAN

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Moh. Ilham Akbar Arrizqo
Nrp. 4215 105 003

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :



Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc.
NIP 1960 0319 1987 01 1001

SURABAYA
JULI, 2017

“Halaman ini Sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN POWER ELECTRONIC CONVERTER DENGAN KONTROL JARINGAN SARAF TIRUAN

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada**

**Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Moh Ilham Akbar Arrizqo
Nrp. 4215 105 003**

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



**Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST., MT.
NIP. 1977 0802 2008 01 007**

**SURABAYA
JULI, 2017**

“Halaman ini Sengaja dikosongkan”

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN POWER ELECTRONIC CONVERTER DENGAN KONTROL JARINGAN SYARAF TIRUAN

Nama Mahasiswa : Moh Ilham Akbar Arrizqo
NRP : 4215 105 003
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc.

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa adalah salah satu jenis motor listrik yang cenderung mengalami penurunan kecepatan jika diberi beban sehingga diperlukan suatu pengaturan agar kecepatan dapat dipertahankan sesuai yang diinginkan. Pada penelitian ini, metode untuk mengendalikan kecepatan motor induksi menggunakan *power electronic converter* dengan metode *vector control* yang dikendalikan oleh pengendali berbasis Jaringan saraf tiruan. Data pelatihan didapat dengan memasang pengendali PI, kemudian mencari secara manual parameter PI yang terbaik untuk setiap kondisi kecepatan, lalu mengambil data masukan dan keluaran dari kontroler PI tersebut sebagai data pelatihan. Pengujian dilakukan dengan tiga metode, yaitu pengujian kecepatan tetap serta torsi tetap, kedua perubahan kecepatan referensi dan ketiga pengujian perubahan torsi beban. Respon yang diamati ialah kesalahan (error), waktu naik (T_r), waktu tetap (T_s) dan overshoot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol jaringan saraf tiruan mampu mengendalikan motor induksi dengan error terbesar $< 0.2\%$, waktu naik dan waktu turun terbesar terjadi saat kecepatan tinggi dengan beban maksimal, overshoot hanya terjadi pada kecepatan 50 rad/detik pada beban 100 Nm.

Kata kunci : Motor Induksi, *Power electronic converter*, Jaringan saraf tiruan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

SPEED CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING POWER ELECTRONIC CONVERTER WITH NEURAL NETWORK CONTROLLER

Name : Moh Ilham Akbar Arrizqo
NRP : 4215 105 003
Department : Marine Engineering FTK-ITS
Supervisor : Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc.

ABSTRACT

Three-phase induction motors are one type of electric motor which tends to decrease in speed when given a load, so it takes a control for the speed can be defined as desired. In this research, method to control the speed of induction motor using power electronic converter with vector control which controlled by artificial neural network controller. Training data is obtained by installing PI controller, then manually finding the optimum parameter of each speed condition, and pick the input and output of the PI controller as the data training. The proposed system is tested with three methods first constant speed test as well as constant torque, second the variation of speed reference with constant torque and third variation of load torque with constant speed. The observed response is error, rise time (T_r), steady state time (T_s) and overshoot. The test results show that the control of artificial neural network is capable of controlling the induction motor with the biggest error $< 0.2\%$, Rise time and steady state time biggest occurs at high speed with maximum torque, overshoot only occurs at speed of 50 rad / sec at 100 Nm torque.

Key Word : Induction Motor, Neural Network, Power Electronic Converter

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Power Electronic Converter dengan Kontrol Jaringan Saraf Tiruan”.

Dalam proses penyusunan dan pengerjaan tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan moral yang sangat berarti dari berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan terima kasih khususnya kepada :

1. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS Surabaya,
2. Bapak Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan ilmu bagi penulis,
3. Bapak Adi Kurniawan, S.T., M.T. selaku dosen wali serta arahan dan bantuannya bagi penulis dalam pengambilan judul dan pengerjaan tugas akhir ini,
4. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku Kepala Laboratorium *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) yang selalu mendukung dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis,
5. Bapak Luqman Affandy. ST., Bapak Gusti Rinaldi Z. ST. atas bantuannya saat penyusunan tugas akhir ini
6. Kedua orang tua serta keluarga atas doa, dukungan berupa moril maupun materil diberikan selama ini,
7. Keluarga besar Laboratorium *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) baik dosen, teknisi maupun *member* yang telah memberikan dukungan dan transfer ilmu selama pengerjaan tugas akhir
8. Teman-teman Angkatan Lintas Jalur 2015, dan pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis menyadari bahwa laporan yang telah dikerjakan masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengharapkan kritik saran yang membangun bagi penulis. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Motor Induksi.....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	5
2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa	6
2.2 Power Electronic Konverter.....	10
2.2.1 Penyearah Tiga Fasa (AC → DC)	10
2.2.2. Inverter (DC → AC)	11
2.2.3 Konverter AC → DC→AC	13
2.2.4 Vector Kontrol.....	13
2.3 Logika Jaringan Saraf Tiruan	16
2.3.1 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan	17
2.3.3 Paradigma Pembelajaran.....	20
2.3.4 Algoritma Perambatan Galat Mundur	21
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Umum	23
3.2 Diagram Alir	23

3.3	Identifikasi dan Perumusan masalah	24
3.4	Studi Pustaka	24
3.5	Pengumpulan Data	24
3.6	Permodelan Sistem.....	25
3.6.1	Pemodelan Motor Induksi 3 fasa.....	25
3.6.2	Penyearah 3 fasa dan Inverter 3 fasa	27
3.6.3	Kecepatan Referensi dan Beban.....	27
3.6.4	Pemodelan Vector Control.....	28
3.6.6	Sistem Keseluruhan	33
3.7	Analisa Data.....	34
3.8	Kesimpulan	34
BAB IV		35
PEMBAHASAN		35
4.1.	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan.....	35
4.2.1	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 1 Lapisan Tersembunyi	38
4.2.2	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 2 Lapisan Tersembunyi	40
4.2.3	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 3 Lapisan Tersembunyi	42
4.2.4	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 4 Lapisan Tersembunyi	44
4.2.5	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 5 Lapisan Tersembunyi	46
4.2.6	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 6 Lapisan Tersembunyi	47
4.2.7	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 7 Lapisan Tersembunyi	49
4.2.8	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 8 Lapisan Tersembunyi	51
4.2.9	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 9 Lapisan Tersembunyi	53
4.2.10	Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 10 Lapisan Tersembunyi ...	56
4.2.11	Kontrol Jaringan Saraf Tiruan Terbaik.....	58
4.3	Hasil Simulasi dan Pengujian Respon.....	59
4.3.1	Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan kostan dan beban 100 Nm .	59
4.3.2	Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan kostan dan beban 500 Nm .	64
4.3.3	Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan kostan dan beban 900 Nm .	68
4.3.4	Simulasi dan Pengujian pada kecepatan reverensi bervariasi	73
4.3.5	Pengujian kecepatan referensi konstan dan torsi beban bervariasi.....	73

BAB V	77
PENUTUP	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	77
LAMPIRAN 1	82
LAMPIRAN 2	85

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Konstruksi motor induksi tiga fasa tipe squirrel cage	5
Gambar 2. 2. Rangkaian ekivalen q motor induksi 3 fasa	7
Gambar 2. 3. Rangkaian ekivalen d motor induksi 3 fasa	7
Gambar 2. 4. Rangkaian Diode Penyearah 3 fasa	10
Gambar 2. 5. Gelombang V_{input} dan V_{output} rectifier.	11
Gambar 2. 6. Rangkaian Inverter Tiga Fasa	12
Gambar 2. 7. Switching Inverter 6 Pulsa	12
Gambar 2. 8. Konverter AC-DC-AC dan motor AC	13
Gambar 2. 9. Vektor fluks dan arus stator	14
Gambar 2. 10. Bentuk Dasar Neuron	16
Gambar 2. 11. Jaringan Lapis Tunggal	17
Gambar 2. 12. Jaringan Banyak Lapisan	18
Gambar 2. 13. Jaringan Saraf dengan Kompetitif	18
Gambar 2. 14. Fungsi Alih Hard Limit	19
Gambar 2. 15. Fungsi Alih Linear	20
Gambar 2. 16. Fungsi alih log-sigmoid	20
Gambar 2. 17. Tiga Lapis Jaringan Perambatan Galat mundur	21
Gambar 3. 1. Diagram Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi.....	25
Gambar 3. 2. Pemodelan motor induksi pada MATLAB Simulink.....	26
Gambar 3. 3. Blok konfigurasi dan parameter motor induksi pada MATLAB	26
Gambar 3. 4. Inverter IGBT 3 Fasa (a) Penyearah 3 fasa (b).....	27
Gambar 3. 5. Signal Builder (a) Constan dan Step (b).....	27
Gambar 3. 6. Pemodelan vector control.....	28
Gambar 3. 7. Blok diagram fluks.....	28
Gambar 3. 8. Blok diagram konversi arus.....	28
Gambar 3. 9. Blok diagram sudut fasa	29
Gambar 3. 10. Blok diagram arus d referensi.....	29
Gambar 3. 11. Blok diagram arus q referensi.....	29
Gambar 3. 12. Blok diagram konversi arus.....	30
Gambar 3. 13. Blok diagram regulator arus	30
Gambar 3. 14. Blok rangkaian vector control matlab dengan PI kontrol.....	30
Gambar 3. 15. Kontroller PI.....	31
Gambar 3. 16. Neural natwork fitting tool	31
Gambar 3. 17. Penentuan sample pelatihan.....	32
Gambar 3. 18. Rangkaian Pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa	33
Gambar 3. 19. Blok rangkaian vector control matlab dengan JST kontro.....	34
Gambar 4. 1. Diagram blok JST <i>fitting tool</i> (a), Struktur JST <i>fitting tool</i>	36
Gambar 4. 2. Proses input (a), Block parameter input (b).....	36
Gambar 4. 3. Susunan Layer pertama	36
Gambar 4. 4. Jumlah lapisan tersembunyi.....	37

Gambar 4. 5. Nilai dari setiap bobot lapisan tersembunyi	37
Gambar 4. 6. Susunan Layer output	37
Gambar 4. 7. Bobot lapisan output	37
Gambar 4. 8. Struktur proses output	38
Gambar 4. 9. Block parameter input	38
Gambar 4. 10. Grafik <i>Performance</i> JST 1 lapisan tersembunyi	39
Gambar 4. 11. Grafik Regresion JST 1 lapisan tersembunyi	40
Gambar 4. 12. Struktur jaringan saraf tiruan 1 lapisan tersembunyi	40
Gambar 4. 13 Grafik <i>Performance</i> JST 2 lapisan tersembunyi	41
Gambar 4. 14 Grafik Regresion	41
Gambar 4. 15 Struktur jaringan saraf tiruan 2 lapisan tersembunyi	42
Gambar 4. 16 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi	43
Gambar 4. 17 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi	43
Gambar 4. 18 Struktur jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi	43
Gambar 4. 19. Struktur jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi	44
Gambar 4. 20 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi	45
Gambar 4. 21 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi	45
Gambar 4. 22 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi	46
Gambar 4. 23 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi	47
Gambar 4. 24 Struktur jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi	47
Gambar 4. 25 Struktur jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi	48
Gambar 4. 26 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi	49
Gambar 4. 27 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi	49
Gambar 4. 28 Struktur jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi	50
Gambar 4. 29 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi	51
Gambar 4. 30 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi	51
Gambar 4. 31 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi	52
Gambar 4. 32 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi	53
Gambar 4. 33 Struktur jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi	53
Gambar 4. 34 Struktur jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi	54
Gambar 4. 35 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi	55
Gambar 4. 36 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi	55
Gambar 4. 37 Grafik <i>Performance</i> jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi	57
Gambar 4. 38 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi	57
Gambar 4. 39 Struktur jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi	57
Gambar 4. 40 Grafik nilai Error JST 10 lapisan tersembunyi	58
Gambar 4. 41 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 100 Nm	59
Gambar 4. 42 Torsi 100 Nm pada kecepatan 50 rad/detik	60
Gambar 4. 43 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 100 Nm	60
Gambar 4. 44 Torsi 100 Nm pada kecepatan 100 rad/detik	61
Gambar 4. 45 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 100 Nm	61
Gambar 4. 46 Torsi 100 Nm pada kecepatan 140 rad/detik	62
Gambar 4. 47 Kecepatan terhadap Respon waktu beban 100 Nm	63

Gambar 4. 48 Grafik Kecepatan terhadap nilai error beban 100 Nm	63
Gambar 4. 49 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 500 Nm.....	64
Gambar 4. 50 Torsi 500 Nm pada kecepatan 50 rad/detik	64
Gambar 4. 51 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 500 Nm.....	65
Gambar 4. 52 Torsi 500 Nm pada kecepatan 100 rad/detik	65
Gambar 4. 53 Torsi 500 Nm pada kecepatan 140 rad/detik	66
Gambar 4. 54 Kecepatan terhadap respon beban 500 Nm	67
Gambar 4. 55 Kecepatan terhadap nilai error beban 500 Nm	68
Gambar 4. 56 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 900 Nm.....	69
Gambar 4. 57 Torsi 900 Nm pada kecepatan 50 rad/detik	69
Gambar 4. 58 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 900 Nm.....	70
Gambar 4. 59 Torsi 900 Nm pada kecepatan 100 rad/detik	70
Gambar 4. 60 Respon waktu pada kecepatan 140 rad/detik dengan torsi 900 Nm.....	71
Gambar 4. 61 Torsi 900 Nm pada kecepatan 140 rad/detik	71
Gambar 4. 62 Kecepatan terhadap respon beban 900 Nm	72
Gambar 4. 63 Grafik Kecepatan motor terhadap nilai error.....	72
Gambar 4. 64 Hasil simulasi kecepatan referensi bervariasi.....	73
Gambar 4. 65 Hasil simulasi motor Induksi dengan kecepatan referensi konstan dan torsi beban bervariasi (a) Torsi (b) Kecepatan	74

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Spesifikasi motor induksi.....	25
Tabel 4. 1. Nilai P dan I pada setiap kecepatan dan beban.....	35
Tabel 4. 2. Nilai error JST 1 lapisan tersembunyi	38
Tabel 4. 3. Nilai error JST 2 lapisan tersembunyi	40
Tabel 4. 4. Nilai bobot 2 lapisan tersembunyi.....	41
Tabel 4. 5. Nilai error JST 4 lapisan tersembunyi	44
Tabel 4. 6. Nilai bobot 4 lapisan tersembunyi.....	44
Tabel 4. 7. Nilai error JST 5 lapisan tersembunyi	46
Tabel 4. 8. Nilai bobot 5 lapisan tersembunyi.....	46
Tabel 4. 9. Nilai error JST 6 lapisan tersembunyi	48
Tabel 4.10. Nilai bobot 6 lapisan tersembunyi.....	48
Tabel 4.11. Nilai error JST 7 lapisan tersembunyi	50
Tabel 4.12. Nilai bobot 7 lapisan tersembunyi.....	50
Tabel 4.13. Nilai error JST 8 lapisan tersembunyi	52
Tabel 4.14. Nilai bobot 8 lapisan tersembunyi.....	52
Tabel 4.15. Nilai error JST 9 lapisan tersembunyi	54
Tabel 4.16. Nilai bobot 9 lapisan tersembunyi.....	54
Tabel 4.17. Nilai error JST 10 lapisan tersembunyi	56
Tabel 4.18. Nilai bobot 10 lapisan tersembunyi.....	56
Tabel 4.19. Hasil error JST setiap lapisan tersembunyi	58

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini dengan kemajuan teknologi yang sangat pesat terutama di bidang industri rekayasa yang sebagian besar banyak menggunakan motor listrik sebagai alat penggerak utama. Motor industri tiga fasa adalah salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan sebagai penggerak, seperti conveyor, pompa besar, dan peralatan-peralatan lainnya. Motor induksi tiga fasa juga merupakan salah satu jenis yang cukup dikenal mempunyai kecepatan konstan saat arus rotor diinduksikan, tidak di perlukan sikat maupun *slipring*. Selain itu kelebihan yang lain dari motor induksi tiga fasa adalah ukuran yang relatif kecil, konstruksi sederhana namun kokoh, harga relatif murah dan perawatan yang mudah.

Berbagai kelabihan itulah membuat motor induksi tiga fasa mulai di coba dimanfaatkan pada bidang sistem penggerak utama salah satunya sistem propulsi kapal. Sistem propulsi yang membutuhkan kecepatan yang berubah sebagai contoh ketika berada di daerah pelabuhan, kapal bergerak dengan kecepatan rendah dan saat berada di perairan lepas, kapal dapat melaju dengan kecepatan maksimum. Akan tetapi hal ini menjadi salah satu kelemahan motor induksi, dimana pengaturan kecepatan pada motor induksi lebih sulit dibandingkan motor listrik lainnya. Berdasarkan dari teori, kecepatan motor induksi tiga fasa bergantung pada banyak kutub dan frekuensi. Maka tindakan yang bisa kita lakukan ialah mengatur jumlah kutub dan frekuensinya, metode pengubahan jumlah kutub dirasa lebih sulit dan butuh banyak pertimbangan untuk diterapkan. Oleh sebab itu cara lain yang bisa dilakukan ialah melalui perubahan frekuensi yang diatur sehingga kecepatan dapat atur dan dipertahankan meski terjadi pembebanan.

Beberapa metode mulai di kembangkan sebagai pengaturan kecepatan motor induksi agar menjadi memungkinkan. Salah satu teknik digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa adalah dengan menggunakan *Power Electronic Converter* yang terdiri dari penyearah tiga fasa (*rectifier*) dan inverter yang di kendalikan dengan metode *vector kontrol*. Agar didapatkan kecepatan yang diinginkan diperlukan kontroler yang memiliki algoritma sistem yang cukup baik hal tersebut bertujuan agar menghasilkan nilai *overshoot* yang rendah, respon waktu yang cukup baik serta *steady state error* yang kecil, salah satunya kontrol sistem jaringan saraf tiruan. Jaringan saraf tiruan menggunakan sistem kendali cerdas, sehingga mampu beradaptasi terhadap perubahan nilai parameter pada plant, yang nantinya diharapkan respons plant mampu beradaptasi terhadap nilai dari set point serta tingkat performan atau efisiensi sistem dalam mengatur variable kontrol tersebut.

Pada tugas akhir ini di lakukan peraturan kecepatan pada motor induksi 3 fasa menggunakan *power electronic converter* dengan kontrol jaringan saraf tiruan yang bertujuan mengetahui struktur kontrol jaringan saraf tiruan, mengetahui tingkat akurasi pengendalian untuk kecepatan yang bervariasi yang berubah karena perubahan beban serta bagaiman respon waktu yang di hasilkan

1.2 Perumusan Masalah

Pokok permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Bagaimana susunan kontrol jaringan saraf tiruan untuk mengontrol kecepatan induksi 3 fasa?
2. Berapa akurasi pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan kontroler jaringan saraf tiruan ?
3. Bagaimana respon waktu pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan kontroler jaringan saraf tiruan ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan permasalahan yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Analisa hanya difokuskan pada pengaturan kecepatan motor 3 fasa Pengaturan kecepatan menggunakan kontrol Jaringan Saraf Tiruan
2. Simulasi menggunakan Matlab Simulink yang dilakukan dengan menampilkan kondisi sistem dan pengendali dalam keadaan ideal.
3. Pengumpulan data kontrol jaringan syaraf tiruan menggunakan metode set Pelatihan yang di dapat dari kontrol PI

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui bagaimana rangkaian konfigurasi sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan jaringan saraf tiruan
2. Mengetahui besarnya akurasi pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan kontroler jaringan saraf tiruan
3. Mengetahui respon waktu yang diperlukan dalam pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penulisan tugas akhir ini secara umum adalah.

1. Dapat memperoleh permodelan sistem pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa dengan tingkat akurasi terbaik dan memiliki respon waktu yang baik

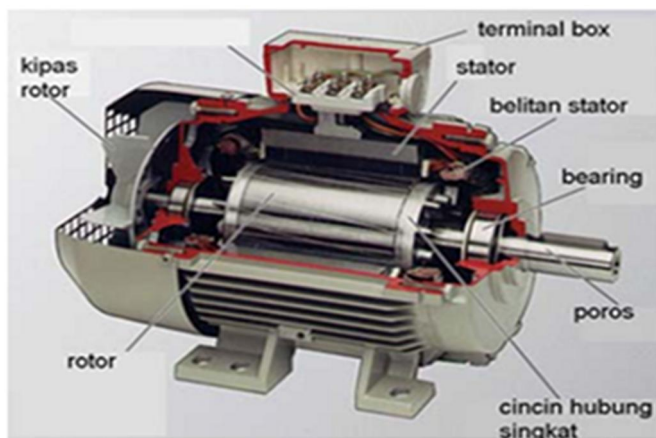
2. Sebagai penunjang untuk penelitian – penelitian selanjutnya mengenai pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dan di implementasikan pada sistem lain.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Berdasarkan tegangan kerjanya, motor induksi bekerja dengan sumber tegangan ac satu fasa atau tiga fasa. Salah satu jenis motor induksi adalah tipe squirrel cage yang mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan motor DC. Beberapa kelebihannya adalah perawatannya mudah, lebih handal, harganya relatif murah dan memiliki efisiensi yang tinggi. Motor jenis ini banyak dioperasikan pada kecepatan dan beban konstan. [2]



Gambar 2. 1. Konstruksi motor induksi tiga fasa tipe squirrel cage^[9]

Motor induksi terdiri dari rangkaian stator (bagian yang tetap), rangkaian rotor (bagian yang bergerak), bearing mekanik dan celah udara yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Sebuah motor induksi tiga fasa tipe squirrel cage terdiri dari kumparan tiga fasa seimbang pada stator, sedangkan pada rotor mempunyai konduktor yang dihubungkan pada bagian akhir.

2.1.1 Prinsip Kerja Motor Induksi^[1]

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara kecepatan rotasi rotor dan kecepatan rotasi medan putar (rotating magnetic field) yang dihasilkan oleh arus stator.

Kumparan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berotasi dengan kecepatan rotasi sinkron yang dinyatakan sebagai berikut :

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

N_s = Kecepatan Putar

f = Frekuensi Sumber

p = Jumlah kutub motor

Medan magnet putar pada stator tersebut akan memotong penghantar-penghantar pada rotor, sehingga terinduksi arus dan sesuai dengan Hukum Lenz rotor pun akan turut berputar mengikuti medan magnet putar stator. Perbedaan kecepatan rotasi relatif antara stator dan rotor disebut slip, yang dinyatakan dalam sebagai berikut :

$$S = (N_s - N_r) / N_s \times 100\% \dots\dots(2.2)$$

Dimana : S = slip

N_s = kecepatan rotasi motor induksi

N_r = kecepatan dasar dalam rpm

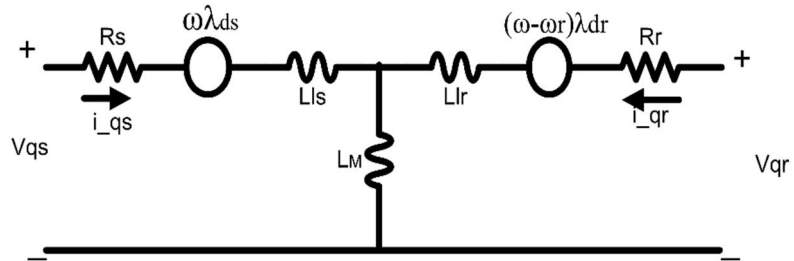
Bertambahnya beban akan memperbesar torsi beban motor, sehingga memperbesar arus induksi pada rotor, dan slip antara medan magnet putar stator dan kecepatan rotor juga akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, kecepatan rotor cenderung menurun.

2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa ^[9]

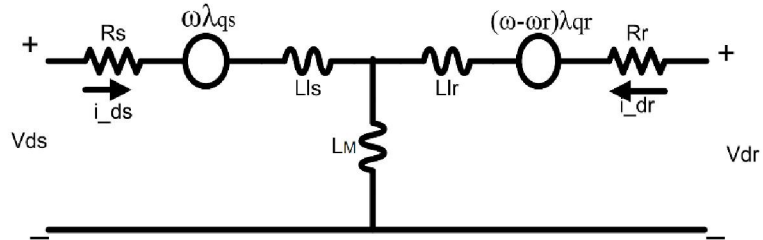
Motor induksi agar lebih mudah untuk menganalisis maka digunakan rangkaian ekuivalen d-q seperti pada gambar 2.2. dan 2.3. Keadaan motor induksi dapat dianggap sebagai transformator, dimana stator merupakan rangkaian primer dan rotor sebagai rangkaian sekunder. Tegangan sumber diasumsikan sinusoidal dan dalam keadaan tunak.

Tegangan sumber yang tidak sinusoidal akan mengakibatkan masalah tersendiri dan terjadi perubahan beban. Pemodelan motor induksi dalam referensi d-q dibutuhkan untuk masalah ini sehingga analisis terhadap motor induksi dapat dilakukan lebih mudah dan fleksibel.

Model yang digunakan adalah model motor induksi dalam koordinat d-q dimana memerlukan transformasi koordinat tiga fasa (koordinat abc) menjadi koordinat dua fasa (koordinat d-q).



Gambar 2. 2.Rangkaian ekivalen q motor induksi 3 fasa [2]



Gambar 2. 3.Rangkaian ekivalen d motor induksi 3 fasa [2]

Model d-q motor induksi merupakan dasar pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode kontrol vektor . Tegangan referensi pada koordinat d-q (V_{d-q}) dapat ditentukan dengan mengikuti Persamaan (2.3).

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= r_s \cdot i_s + \omega \cdot \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qs} \\
 V_{ds} &= r_s \cdot i_s - \omega \cdot \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{ds} \\
 V_{qr} &= r_s \cdot i_{qr} + (\omega \cdot \omega_r) \omega \cdot \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qr} \\
 V_{dr} &= r_s \cdot i_{dr} - (\omega \cdot \omega_r) \omega \cdot \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{dr}
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Keunggulan model motor induksi dalam koordinat d-q, selain mempermudah analisis, agar motor tersebut memiliki sifat yang menyerupai motor DC, sehingga lebih mudah dikontrol. Analisis tersebut meliputi tegangan stator, tegangan rotor, fluks stator dan fluks rotor, serta torsi elektromagnetik. Berdasarkan gambar 2.2 dan 2.3, persamaan

tegangan stator dan rotor motor induksi merupakan fungsi arus stator dan arus rotor, sedangkan fungsi fluks yang tercakup pada kumparan dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.4).

$$\begin{aligned}\lambda_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \lambda_{qr} &= L_r \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\ \lambda_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}\end{aligned}\quad (2.4).$$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (2.4) ke dalam Persamaan(2.3), maka akan didapat Persamaan (2.5).

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pL_m & \omega L_m \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega L_m & pL_m \\ pL_m & (\omega - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & pL_m & -(\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

dengan

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.6)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

dilakukan pemisahan antara variabel yang mengandung turunan, sehingga bentuk persamaannya menjadi:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega \cdot L_s & 0 & \omega \cdot L_m \\ -\omega \cdot L_s & R_s & -\omega \cdot L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_m & R_r & (\omega_e - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & 0 & pR_r & 0 \\ 0 & pL_m & 0 & pL_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

dalam bentuk lain, persamaan di atas dapat menjadi seperti di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_e \cdot L_s & 0 & \omega_e \cdot L_m \\ -\omega \cdot L_s & R_s & -\omega_e \cdot L_m & 0 \\ 0 & (\omega_e - \omega_r)L_m & R_r & (\omega_e - \omega_r)L_r \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega_e - \omega_r)L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & pR_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

$$\text{Misal, } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_e \cdot L_s & 0 & \omega_e \cdot L_m \\ -\omega_e \cdot L_s & R_s & -\omega_e \cdot L_m & 0 \\ 0 & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & 0 & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Dan } \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & pR_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}. \text{ Persamaan di atas dapat dibentuk menjadi}$$

lebih sederhana yaitu :

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \mathbf{Q} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

Apabila yang ingin dicari nilai arus, maka persamaan di atas menjadi :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) akan digunakan untuk mencari nilai arus dari motor induksi. Dalam model matematis motor induksi terdapat nilai tahanan dan induktansi yang harus diketahui sebagai parameter. Selain nilai tahanan dan induktansi, pada perancangan simulasi motor induksi diperlukan parameter-parameter motor induksi lainnya seperti nilai inerti, jumlah kutub, dll

Dimana beberapa parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

V_{qs}, V_{ds} :	tegangan stator pada sumbu d-q	(Volt)
V_{qr}, V_{dr} :	tegangan rotor pada sumbu d-q	(Volt)
i_{qs}, i_{ds} :	arus stator pada sumbu d-q	(Ampere)
i_{qr}, i_{dr} :	arus rotor pada sumbu d-q	(Ampere)
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$:	fluks stator pada sumbu d-q	(Ampere)
$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$:	fluks rotor pada sumbu d-q	(Ampere)

R_s : tahanan stator (Ω)

R_r : tahanan rotor (Ω)

L_{ls}	: induktansi diri stator	(Henry)
L_{lr}	: induktansi diri rotor	(Henry)
L_M / M	: induktansi mutual	(Henry)
ω / ω_s	: kecepatan rotor / kecepatan sinkron	(rad/s)
P	: jumlah kutub	[buah]
T_e	: torsi elektromagnetik	[Nm]

2.2 Power Electronic Konverter [3]

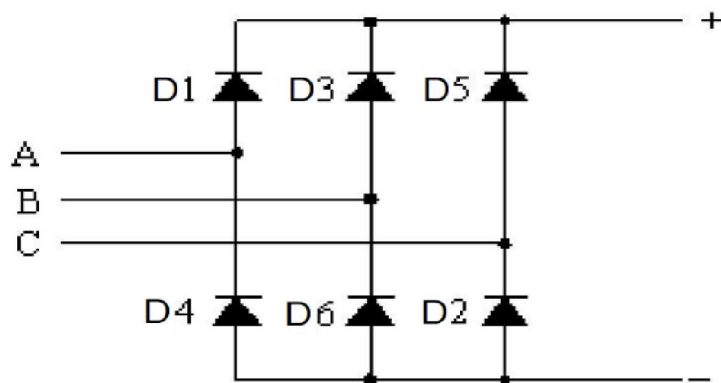
Pengaturan kecepatan/kecepatan untuk sebuah motor listrik memerlukan voltase variable untuk motor penggerak DC dan frekuensi ditambah voltase variable untuk motor penggerak AC. Voltase AC yang di set pada busbar harus di ubah oleh rektifire (AC to DC) dan/atau inversi yang terkontrol (DC ke AC) agar sesuai dengan jenis motor listrik.

2.2.1 Penyearah Tiga Fasa (AC \rightarrow DC)

Penyearah tiga fasa atau *Rectifier* digunakan untuk mengkonversi tunggal atau tiga fase arus bolak-balik ke arus searah^[6]. Arus searah (DC) dipakai untuk berbagai keperluan misalnya pengisi akumulator, *power supply*, baterai dan lain sebagainya. Secara umum penyearah ini menggunakan komponen elektronika yaitu diode atau thyristor.^[7]

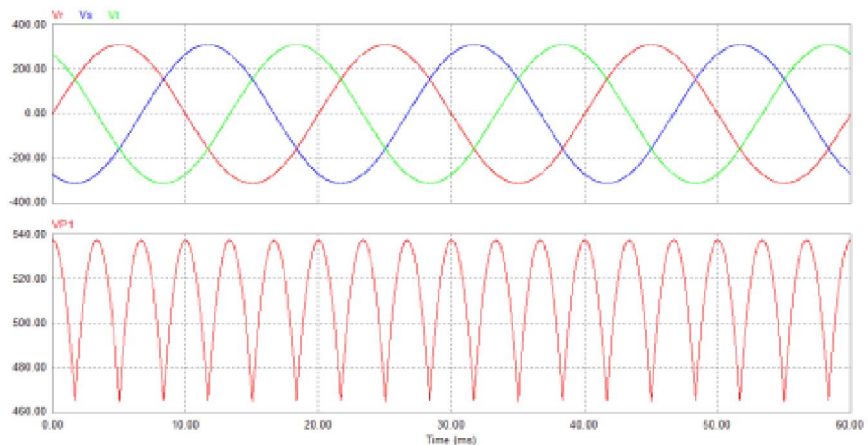
Penyearah dengan diode sering disebut sebagai penyearah tanpa kendali, yang artinya tegangan keluaran yang dihasilkan nilainya tetap dan tidak bisa dikendalikan. Penyearah tak terkendali tiga fasa pada umumnya banyak dijumpai dalam sector industri. ^[7]

Penyearah diode gelombang penuh tiga fasa menggunakan sistem jembatan dengan enam buah lihat pada gambar 2.4,



Gambar 2. 4.Rangkaian Diode Penyearah 3 fasa ^[7]

Diode D1, D3, dan D5 katodanya disatukan sebagai terminal positif. Diode D2, D4, D6, anodanya yang disatukan sebagai terminal negative. Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan oleh masing-masing diode tersebut lihat gambar 2.5.



Gambar 2. 5. Gelombang V_{input} dan V_{output} rectifier. [7]

Untuk menentukan tegangan keluaran dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_m = \sqrt{2} \times V_{rms} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : V_m = Tegangan Maksimal
 V_{rms} = Tegangan Terukur

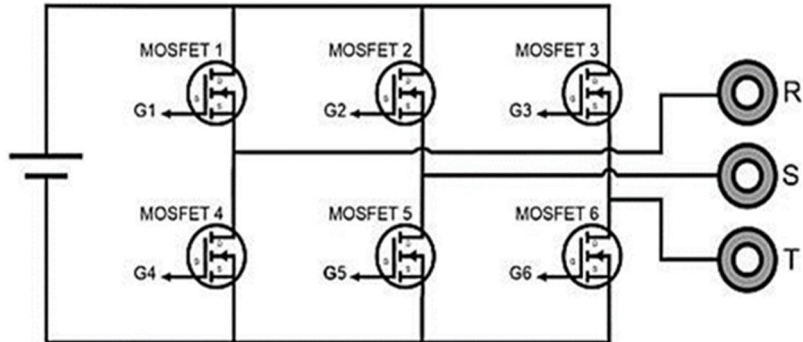
$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_m \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana : V_{dc} = Tegangan DC
 V_m = Tegangan Maksimal
 π = 3.14

2.2.2. Inverter (DC \rightarrow AC) [5]

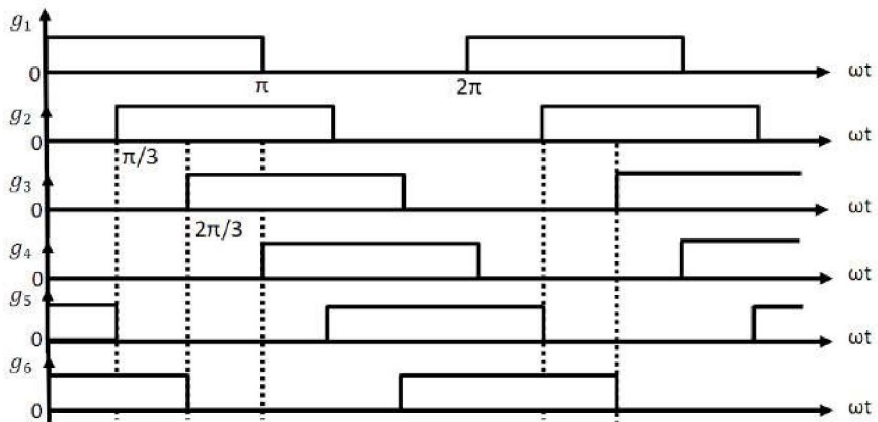
Konverter DC ke AC dinamakan inverter, fungsi sebuah inverter adalah mengubah arus input DC menjadi arus output AC dengan besar dan frekwensi yang diinginkan. Inverter tiga fasa terdiri dari enam semikonduktor yang memanfaatkan proses *switching*. Proses *switching* yang tepat pada inverter akan menghasilkan gelombang tegangan AC tiga fasa pada terminal tegangan keluaran inverter (V_o). *Switching* inverter bekerja secara berpasangan dan bekerja (*on-off*) secara bergantian.

Alat yang berfungsi sebagai *switch* adalah GTO (*Gate Turn Off Thyristor*), MOSFET atau IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) Rangkaian inverter tiga fasa diperlihatkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6.Rangkaian Inverter Tiga Fasa [5]

Terdapat tiga pasang saklar yang menyala pada setiap waktu yang berbeda, terdapat enam mode operasi dalam satu siklus dan saklar dinomori dengan urutan switching-nya yaitu S1 S2 S3, S2 S3 S4, S3 S4 S5, S4 S5 S6, S5 S6 S1 dan S6 S1 S2. Pada saat peralihan cepat saklar bekerja, dan tegangan DC pada kapasitor harus dijaga konstan.

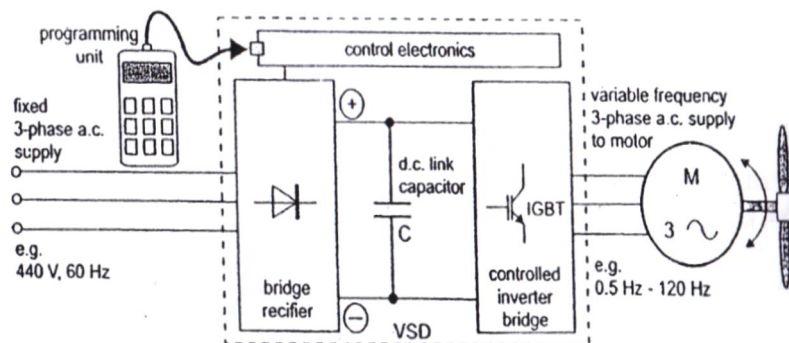


Gambar 2. 7.Switching Inverter 6 Pulsa [5]

Gate satu (G1) berfungsi untuk memasukkan gelombang persegi G1 seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. gelombang ini digunakan dalam proses switching komponen semikonduktor satu (MOSFET 1) agar menghasilkan tegangan dengan fasa positif. Tegangan fasa negatif dihasilkan oleh komponen MOSFET 2 dengan input switching G2 yang gelombangnya berkebalikan dengan G1.

2.2.3 Konverter AC \rightarrow DC \rightarrow AC [3]

Konverter ini digunakan untuk penggerak-penggerak motor induksi dan menggunakan transistor transistor sebagai peralatan saklar. Tidak seperti thyristor-thyristor, sebuah transistor bisa dinyalakan dan dimatikan oleh sebuah sinyal pengontrol dan pada laju nyala-mati (switching) tinggi (converter PWM).



Gambar 2. 8. Konverter AC-DC-AC dan motor AC [3]

Masukkan pada tingkat rectifier tidak di kontrol sehingga bisa lebih sederhana dan lebih murah, kemudian sebuah inverter yang dapat di control oleh sebuah controller. Dari sumber pasukan AC, voltase yang sudah di searahkan DC yang diperkuat (rectifier) akan diratakan/dihaluskan oleh kapasitor.

Pengaturan kecepatan terhadap perubahan-perubahan beban sangat baik dan dibuat sangat tepat dengan penambahan umpan balik (feedback) dari sebuah encoder kecepatan poros shaft speed encoder). Variable speed drive (VSD) yang di kotrol secara digital dengan mudahnya bisa dimasukkan dalam jaringan kerja untuk peralatan-peralatan komputer yang lain misalnya pengontrolan-pengontrolan logic yang bisa di program untuk keseluruhan control dari proses yang rumit.

2.2.4 Vector Kontrol [8]

Kontrol vektor atau biasa disebut *field oriented control* ditemukan oleh Blaschke untuk menyamai karakteristik motor DC pada motor induksi. Sebuah metode dalam pengaturan kecepatan medan pada motor ac, dimana dari sistem *coupled* diubah menjadi sistem *decoupled*. Motor induksi merupakan suatu sistem *coupled* dimana terdapat saling ketegantungan antara torsi dan fluks. Dengan menggunakan sistem vektor kontrol ini pengaturan arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah sehingga torsi dan fluks motor juga dapat diatur

secara terpisah. Proses *decoupled* secara matematis dilakukan melalui 2 tahap yaitu dengan menggunakan transformasi Clarke dan transformasi Park.

Pemodelan d - q motor induksi merupakan model dasar dalam sistem pengaturan berbasis vektor kontrol. Sistem koordinat tiga fasa statis ditransformasikan ke koordinat dinamis d - q , koordinat ini berputar mengikuti kecepatan sinkron motor atau medan putar stator. Untuk mendapatkan tegangan dan arus dengan referensi koordinat d - q maka dilakukan transformasi koordinat tiga fasa ke koordinat d - q menggunakan Transformasi Park sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta) & \sin\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sedangkan persamaan Torsi elektromagnetik untuk motor induksi adalah sebagai berikut :

$$T_e = \frac{3}{2} PM (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (2.11)$$

Kecepatan motor induksi merupakan fungsi dari torsi elektromagnetik dengan torsi beban yang didefinisikan sebagai berikut ini :

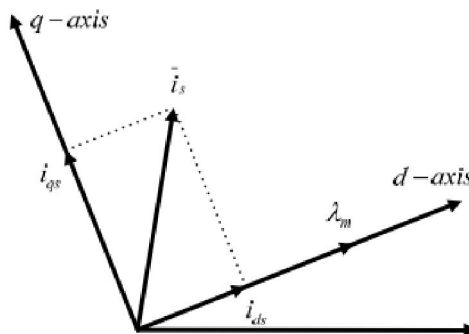
$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega_r + K_d \omega_r = T_e - T_L \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega_r \quad (2.13)$$

Berdasarkan gambar dibawah ini, fluks $\overline{\lambda_m}$ berhimpit dengan sumbu d sehingga fluks dan arus stator dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\overline{\lambda_m} = \lambda_m \quad (2.14)$$

$$\overline{i_s} = i_{ds} + j i_{qs} \quad (2.15)$$



Gambar 2. 9. Vektor fluks dan arus stator [8]

Persamaan torsi elektromagnetik dapat disederhanakan menjadi

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_m i_{qs} \quad (2.16)$$

Apabila dilihat dari persamaan diatas, torsi motor hanya bergantung pada nilai arus stator i_{qs} serta fluks motor $\overline{\lambda_m}$. Sedangkan untuk arus stator i_{ds} mempengaruhi besar dari fluks $\overline{\lambda_m}$. Sehingga untuk mengatur torsi motor dapat dilakukan dengan cara mengatur fluks dan arus stator i_{qs} .

Pada penelitian tugas akhir ini, sinyal kontrol dari model blok rangkaian kontroler berupa Torsi Referensi (T_e^*) yang digunakan untuk mengatur arus torsi (i_{qs}). Arus Torsi ini (i_{qs}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$i_q = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{\lambda_r} \quad (2.17)$$

arus torsi referensi ini akan dibandingkan dengan arus i_{qs} hasil dari vektor transformasi ABC-DQ.

Phi merupakan fluks dari rotor, hasil dari perubahan arus stator i_{ds} (keluaran dari vektor transformasi ABC-DQ) yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini

$$\lambda_r = \frac{L_m \cdot i_{ds}}{1 + \tau_r s} \quad (2.18)$$

Dimana : $\tau_r = L_r / R_r$ merupakan konstanta waktu

Selanjutnya fluks rotor dan arus stator i_{qs} digunakan untuk menentukan besarnya nilai dari perubahan posisi atau sudut fluks rotor (θ 'teta').

Nilai teta sendiri merupakan integral dari penjumlahan antara kecepatan sudut rotor dengan kecepatan frekuensi slip rotor

$$\theta_e = \int \omega_m + \omega_{sl} dt \quad (2.19)$$

Kecepatan slip rotor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\lambda_r} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs} \quad (2.20)$$

Dimana ω_{sl} = kecepatan frekuensi slip rotor (rad/dt)

ω_m = kecepatan angular mekanis rotor (rad/dt)

Nilai dari Teta ' θ_e ' tersebut diatas diperlukan dalam proses transformasi arus stator dari koordinat tiga fasa ABC (i_a, i_b, i_c) ke dalam arus stator koordinat $d-q$ (i_{ds}, i_{qs}) dan juga berlaku sebaliknya dari koordinat $d-q$ ke dalam koordinat ABC menggunakan persamaan berikut ini

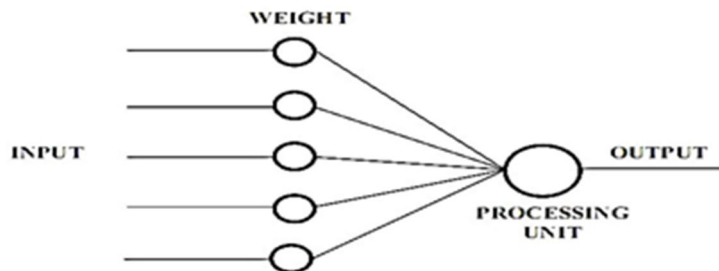
$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_e + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_e\right) & \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_e - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_e\right) \\ -\sin \theta_e & \left(\frac{1}{2} \sin \theta_e + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_e\right) & \left(\frac{1}{2} \sin \theta_e - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_e\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_e + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_e\right) & \left(\frac{1}{2} \sin \theta_e + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_e\right) \\ \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_e - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_e\right) & \left(\frac{1}{2} \sin \theta_e - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_e\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.3 Logika Jaringan Saraf Tiruan ^[10]

Jaringan saraf tiruan (JST) merupakan suatu sistem pemrosesan informasi yang memiliki karakteristik-karakteristik menyerupai jaringan syaraf biologi (fauset,1994). Hal yang sama diutarakanoleh Simon Haykin, yang menyatakan bahwa JST adalah sebuah mesin yang direncanakan untuk memodelkan cara otak manusia mengerjakan fungsi atau tugas-tugas tertentu. Mesin ini memiliki kemampuan menyimpan pengetahuan berdasarkan pengalaman dan menjadikan simpanan pengetahuan yang dimiliki menjadi bermanfaat.

JST ini merupakan sistem adaptif yang dapat merubah strukturnya untuk memecahkan masalah berdasarkan informasi eksternal maupun internal yang mengalir melalui jaringan tersebut. Secara sederhana JST adalah sebuah alat pemodelan data tatistiknon-linear. JST dapat digunakan untuk memodelkan hubungan yang kompleks antara input dan output untuk menemukan pola-pola pada data. Secara mendasar, sistem pembelajaran merupakan proses penambahan pengetahuan pada JST yang sifatnya kontinuitas sehingga pada saat digunakan pengetahuan tersebut akan dieksploitasikan secara maksimal dalam mengenali suatu objek. Neuron adalah bagian dasar dari pemrosesan suatu JST. Berikut ini merupakan bentuk dasar dari suatu neuron:



Gambar 2. 10. Bentuk Dasar Neuron ^[5]

Keterangan Gambar 2.10 di atas adalah sebagai berikut.

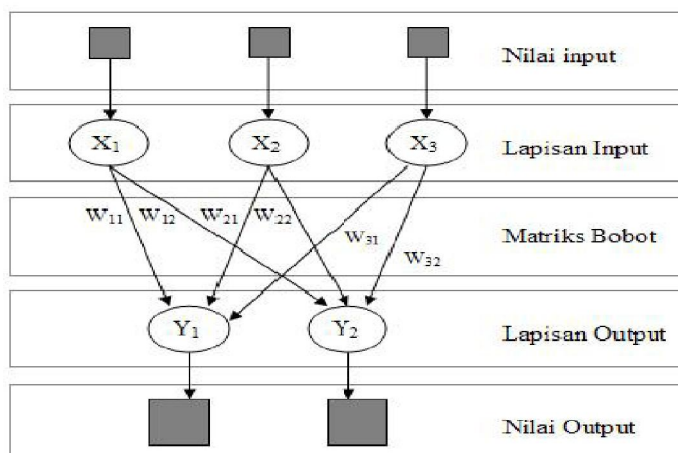
- Input, merupakan masukan yang digunakan baik saat pembelajaran maupun dalam mengenali suatu objek.
- Weight, beban yang selalu berubah setiap kali diberikan input sebagai proses pembelajaran.
- Processing Unit, merupakan tempat berlangsungnya proses pengenalan suatu objek berdasarkan pembebanan yang diberikan.
- Output, keluaran dari hasil pengenalan suatu objek

2.3.1 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan ^[10]

Jaringan saraf tiruan dirancang dengan menggunakan suatu aturan yang bersifat menyeluruh (general rule) di mana seluruh model jaringan memiliki konsep dasar yang sama. Arsitektur sebuah jaringan akan menentukan keberhasilan target yang akan dicapai karena tidak semua permasalahan dapat diselesaikan dengan arsitektur yang sama. Pendapat lain mengenai arsitektur jaringan saraf tiruan adalah sebagai berikut: Jaringan saraf tiruan dibagi ke dalam 3 macam arsitektur

1. Jaringan dengan lapisan tunggal (single layer net).

Jaringan saraf satu lapisan pertama kali dirancang oleh Widrow dan Holfpada tahun 1960. Jaringan dengan lapisan tunggal hanya memiliki satu lapisan dengan bobot terhubung. Jaringan ini hanya menerima input kemudian secara langsung akan mengolahnya menjadi output tanpa harus melalui lapisan tersembunyi.



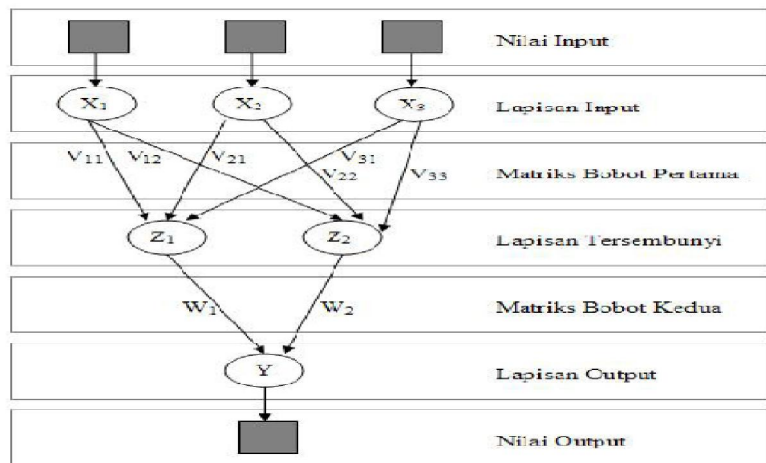
Gambar 2. 11 .Jaringan Lapis Tunggal ^[10]

Pada Gambar 2.11 dijelaskan lapisan input memiliki 3 neuron, yaitu X_1 , X_2 , dan X_3 . Sedangkan lapisan output memiliki 2 neuron, yaitu

Y1 dan Y2. Neuron-neuron pada kedua lapisan saling berhubungan. Seberapa besar hubungan antara 2 neuron ditentukan oleh bobot yang bersesuaian. Semua unit input akan dihubungkan dengan setiap unit output.

2. Jaringan dengan banyak lapisan (multilayer net)

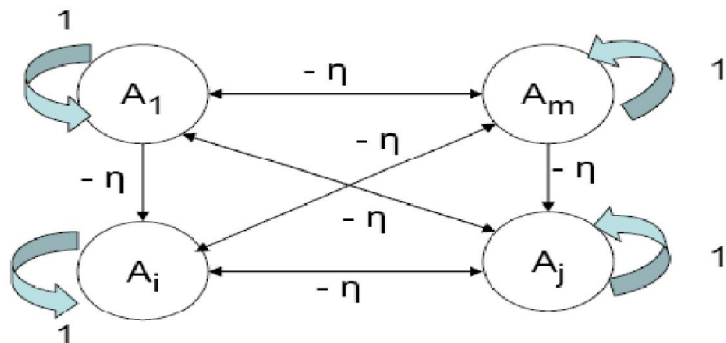
Jaringan dengan banyak lapisan memiliki satu atau lebih lapisan yang terletak di antara lapisan input dan lapisan output seperti terlihat pada Gambar 2.12. Umumnya terdapat lapisan bobot-bobot yang terletak antara 2 lapisan yang bersebelahan. Jaringan dengan banyak lapisan ini dapat menyelesaikan permasalahan yang lebih sulit daripada lapisan dengan lapisan tunggal, dengan pembelajaran yang lebih rumit.



Gambar 2. 12.Jaringan Banyak Lapisan ^[10]

3. Jaringan dengan lapisan kompetitif (compelitif layer net)

Hubungan antara neuron pada lapisan kompetitif ini tidak diperlihatkan pada diagram arsitektur. Gambar 2.13 menunjukkan satu contoh arsitektur jaringan dengan lapisan kompetitif



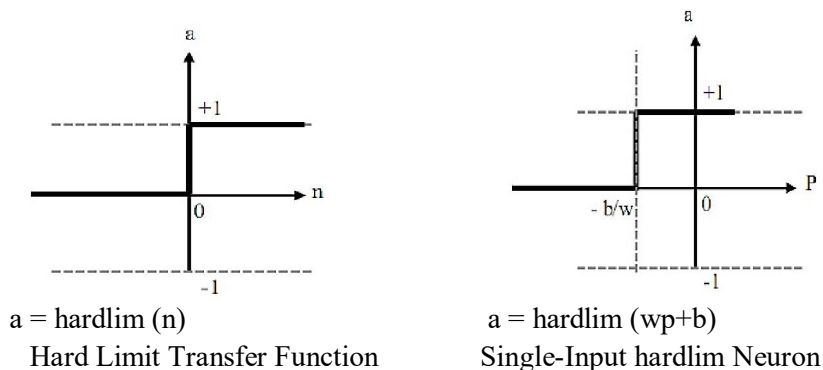
Gambar 2. 13.Jaringan Saraf dengan Kompetitif ^[10]

2.3.2 Fungsi Aktivasi atau Fungsi Transfer ^[5]

Fungsi yang menggambarkan hubungan antara tingkat aktivasi internal (summation function) yang mungkin berbentuk linier atau nonlinier. Beberapa fungsi aktivasi jaringan saraf tiruan di antaranya

1. Fungsi Alih Hard Limit

Fungsi alih hard limit, yang dapat dilihat di bagian kiri pada Gambar 2.22, menunjukkan set keluaran dari neuron pada harga nol (0) jika argument dari fungsi kurang dari 0, atau 1 jika argument lebih dari atau sama dengan nol (0), maka fungsi alih hard limit ini akan menciptakan sebuah neuron yang mengklasifikasikan input ke dalam dua kategori yang berbeda.



Gambar 2. 14. Fungsi Alih Hard Limit ^[5]

Pada sisi kanan dari Gambar 2.14, menggambarkan karakteristik input/output dari single-input neuron yang menggunakan fungsi alih hardlim. Selanjutnya kita dapat melihat efek dari weight dan bias. Pada Gambar 2.16 dapat dilihat bentuk dari fungsi alih hardlim yang diperlihatkan di antara kedua gambar. Secara umum, biasanya bentuk yang digunakan untuk menggantikan diagram jaringan yang menunjukkan suatu fungsi alih tertentu yang sedang digunakan.

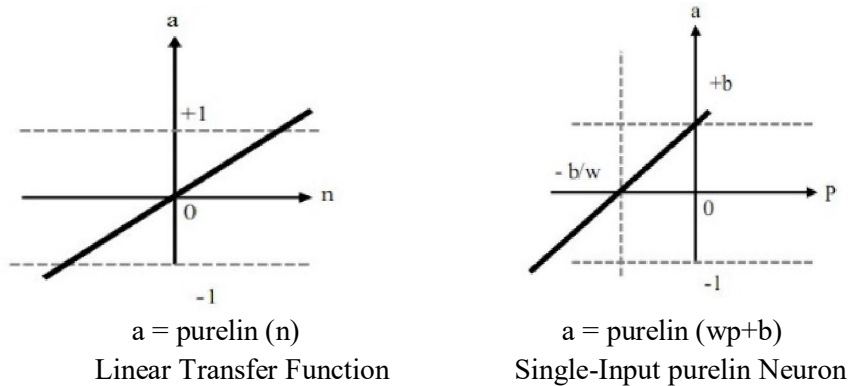
2. Fungsi Alih Linear

Fungsi alih linier nilai keluaran sama dengan nilai masukannya, perhatikan persamaan berikut ini

$$a = n \dots\dots\dots(2.23)$$

Dan ilustrasi untuk fungsi alih linier dapat dilihat pada gambar 2.19.

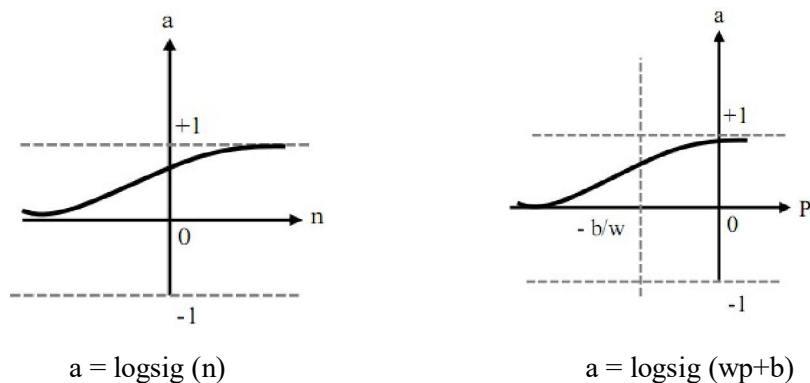
Pada gambar 2.17 bagian kiri dapat ditunjukkan bahwa keluaran (a) sama dengan masukan (p), pada bagian kanan menunjukkan suatu karakteristik dari suatu single-input linear neuron dengan bias

Gambar 2. 15 . Fungsi Alih Linear ^[5]

3. Fungsi alih log-sigmoid

Fungsi alih ini menangani masukan (yang mungkin mempunyai nilai minus maupun plus yang tidak terbatas) dan menghimpit keluaran pada range 0 sampai 1, sesuai dengan persamaan berikut.

$$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}} \quad (2.24)$$

Gambar 2. 16. Fungsi alih log-sigmoid ^[5]

Fungsi alih log-sigmoid pada umumnya digunakan pada multilayer network dengan menggunakan pelatihan backpropagation alghoritm.

2.3.3 Paradigma Pembelajaran ^[11]

Proses pembelajaran merupakan suatu metoda untuk proses pengenalan suatu objek yang sifatnya kontinuitas yang selalu direspon secara berbeda dari setiap proses pembelajaran tersebut. Tujuan dari pembelajaran ini sebenarnya untuk memperkecil nilai error dalam pengenalan suatu objek. Secara mendasar, JST memiliki sistem pembelajaran yang terdiri atas beberapa jenis yaitu sebagai berikut.

1. Supervised Learning (Terbimbing)

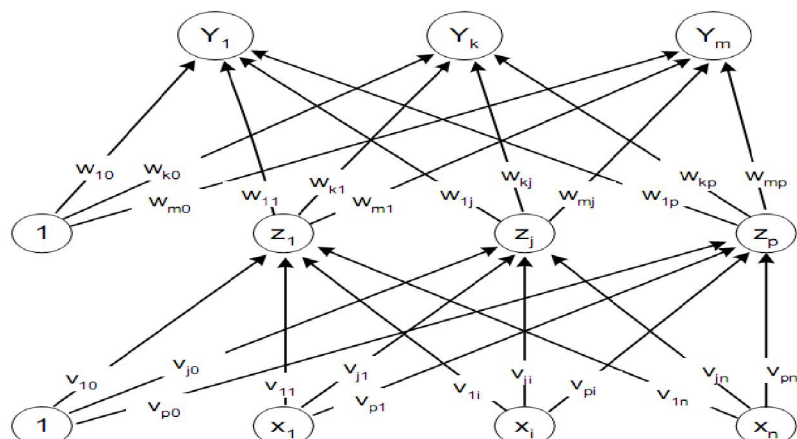
Sistem pembelajaran pada metode supervised learning adalah sistem pembelajaran yang mana setiap pengetahuan yang akan diberikan kepada sistem, pada awalnya diberikan suatu acuan untuk memetakan suatu masukan menjadi suatu keluaran yang diinginkan. Proses pembelajaran ini akan terus dilakukan selama kondisi error atau kondisi yang diinginkan belum tercapai. Adapun setiap perolehan error akan dikalkulasikan untuk setiap pemrosesan hingga data atau nilai yang diinginkan telah tercapai.

2. Unsupervised Learning (Tidak Terbimbing)

Sistem pembelajaran pada JST, sepenuhnya memberikan hasil pada komputasi dari setiap pemrosesan, sehingga pada sistem ini tidak membutuhkan adanya acuan awal, agar perolehan nilai dapat dicapai. Meskipun secara mendasar, proses ini tetap mengkalkulasikan setiap langkah pada setiap kesalahannya dengan mengkalkulasikan setiap nilai weight yang didapat.

2.3.4 Algoritma Perambatan Galat Mundur ^[12]

Jaringan perambatan galat mundur (backpropagation) merupakan salah satu algoritma yang sering digunakan dalam menyelesaikan masalah - masalah yang rumit. Hal ini dimungkinkan karena jaringan dengan algoritma ini dilatih dengan menggunakan metode belajar terbimbing. Pada jaringan diberikan sepasang pola yang terdiri atas pola yang terdiri atas masukan dan pola yang diinginkan



Gambar 2. 17.Tiga Lapis Jaringan Perambatan Galat mundur ^[12]

Ketika suatu pola diberikan kepada jaringan, bobot-bobot diubah untuk memperkecil perbedaan pola keluaran dan pola yang diinginkan. Ketika

suatu pola diberikan kepada jaringan, bobot-bobot diubah untuk memperkecil perbedaan pola keluaran dan pola yang diinginkan Latihan ini dilakukan berulang-ulang sehingga semua pola yang dikeluarkan jaringan dapat memenuhi pola yang diinginkan.

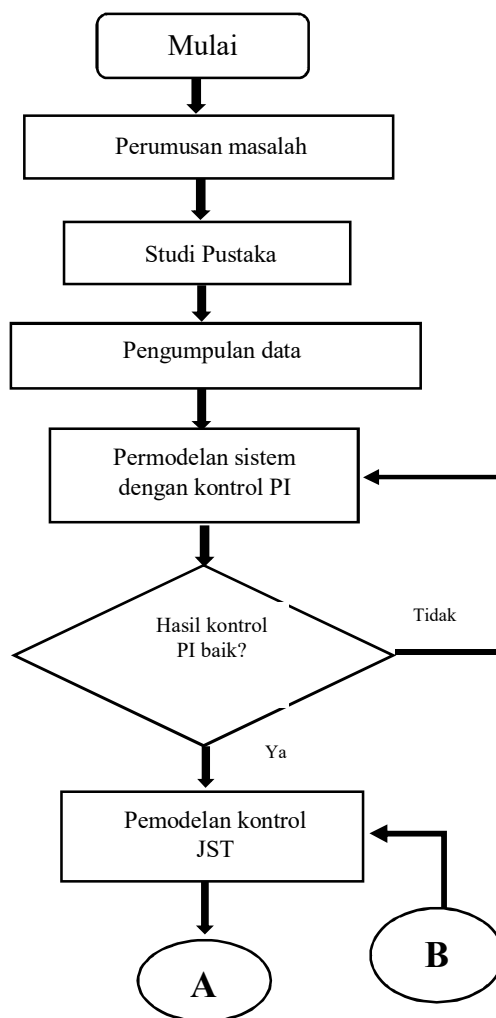
Backpropagation memiliki beberapa unit yang ada dalam satu atau lebih layar tersembunyi. Gambar 2.19 adalah arsitektur backpropagation dengan n buah masukan (ditambah sebuah bias), sebuah layar tersembunyi yang terdiri dari p unit (ditambah sebuah bias), serta m buah unit keluaran. v_{ji} merupakan bobot garis dari unit masukan x_i ke unit layar tersembunyi z_j (v_{j0} merupakan bobot garis yang menghubungkan bias di unit masukan ke unit layar tersembunyi z_j). w_{kj} merupakan bobot dari unit layar tersembunyi z_j ke unit keluaran y_k (w_{k0} merupakan bobot dari bias di layar tersembunyi ke unit keluaran z_k)

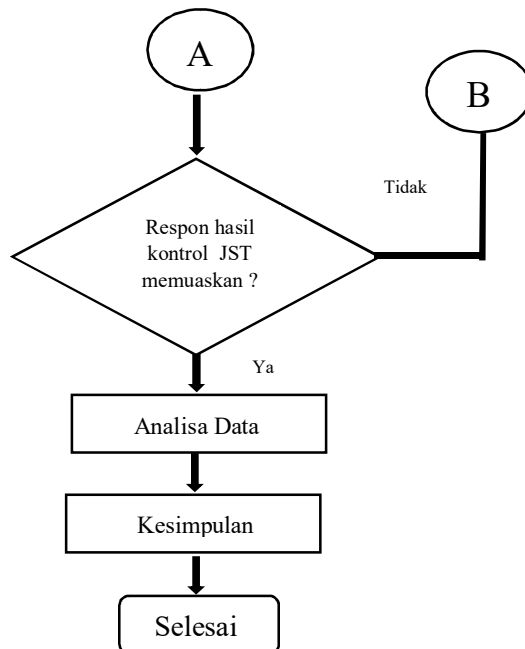
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Metode tugas akhir merupakan urutan sistematis tahapan pengerjaan tugas akhir yang dilakukan sejak dimuainya pengerjaan hingga akhir. Penulisan tugas akhir ini bersifat penelitian sehingga membutuhkan sebuah pengujian simulasi untuk menyelesaikan rumusan masalah dan mencapai tujuan yang diinginkan

3.2 Diagram Alir





3.3 Identifikasi dan Perumusan masalah

Merupakan tahapan awal yang dilakukan dalam penelitian sehingga diketahui masalah apa yang akan diangkat. Dalam penulisan tugas akhir ini permasalahan yang diambil adalah bagaimana pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan jaringan saraf tiruan sebagai kontrol. Hal yang akan difokuskan mencakup susunan kontrol, akurasi yang didapat dan bagaimana respon terhadap waktu sehingga didapat hasil yang dapat dianalisa

3.4 Studi Pustaka

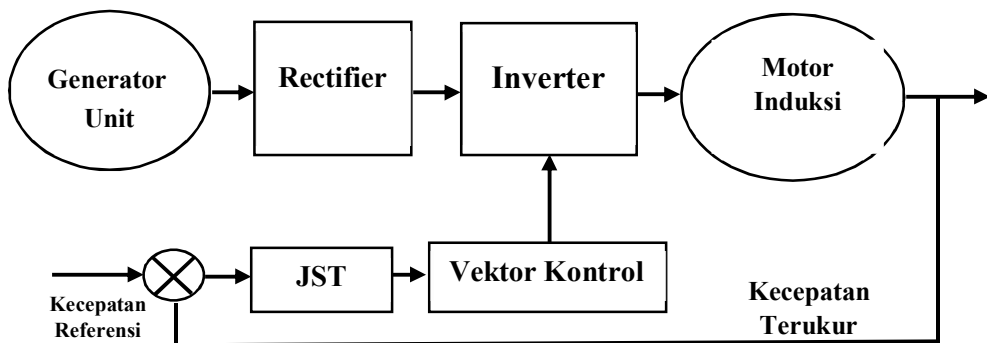
Pada tahapan ini dilakukan pembelajaran terhadap teori-teori yang mendukung perancangan dan akan dibahas dalam penulisan tugas akhir ini. Teori yang dimaksud terkait motor induksi 3 fasa, *electronic converter* meliputi penyearah 3 fasa (AC ke DC), Inverter (DC ke AC), metode Vektor Kontrol dan Jaringan saraf tiruan sebagai kontrol. Sumber yang digunakan sebagai acuan dapat berasal dari buku, jurnal, paper dan internet

3.5 Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan informasi terkait permasalahan yang akan dibahas dalam penulisan tugas akhir ini, sehingga dibutuhkan pengumpulan data. Adapun data yang akan dikumpulkan pada tahap ini antara lain spesifikasi motor induksi 3 fasa, input dan target pembelajaran yang dihasilkan dari kontrol PI

3.6 Permodelan Sistem

Pada tahap ini di lakukan pembuatan atau perancangan menggunakan *software matlab* sebagai media perancangan sistem yang terdiri atas sebuah sumber tegangan AC 400 V sebagai penyuplai tegangan, sebuah *electronic converter* yang terdiri dari penyearah tiga fasa dan inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa, serta sebuah motor induksi sangkar tupai tiga fasa dengan daya nominal 160kW dan kecepatan sinkron 1487 rpm.



Gambar 3. 1. Diagram Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi

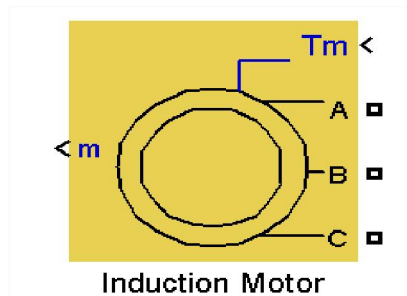
3.6.1 Permodelan Motor Induksi 3 fasa

Motor induksi yang di gunakan dalam tugas akhir ini menggunakan salah satu permodelan motor induksi tipe sangkar tupai pada aplikasi matlab Simulink dengan spesifikasi yang di ditampilkan pada tabel 3.1 sebagai berikut.

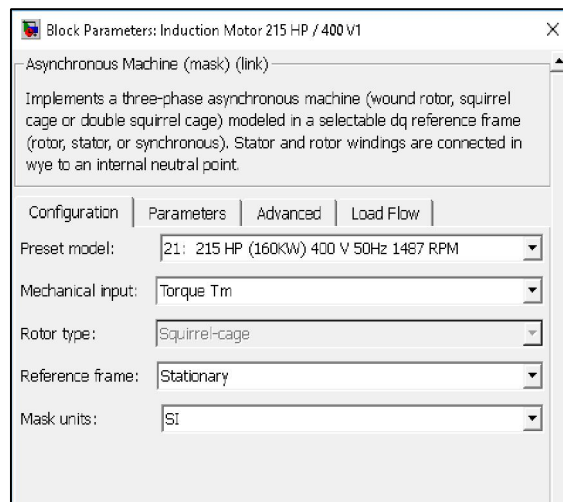
Tabel 3. 1. Spesifikasi motor induksi

Rated values	Power	160 kW	kW
	Frequency	50	Hz
	Voltage	400	V
	Motor Speed	1487	rpm
	Pole Pair	2	
Rated parameter	Rs	0.01379	Ω
	Rr	0.007728	Ω
	Ls	0.000152	H
	Lr	0.000152	H
	M	0.00769	H
Inertia	j	2.9	kg.m2

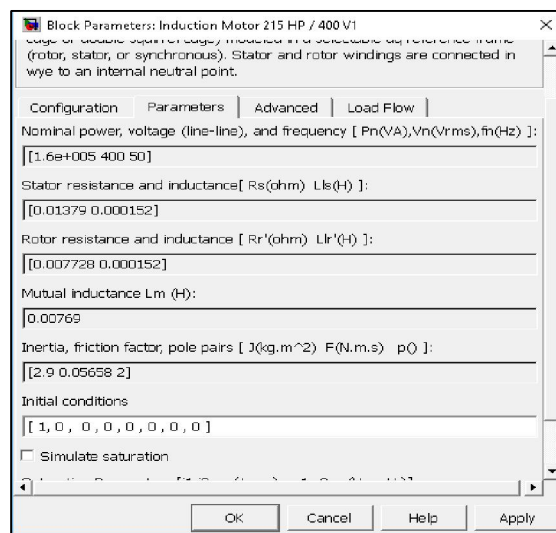
Untuk konfigurasi dan parameter yang digunakan seperti terlihat dalam Gambar 3.2



Gambar 3. 2. Pemodelan motor induksi pada MATLAB Simulink



a. Blok konfigurasi motor induksi

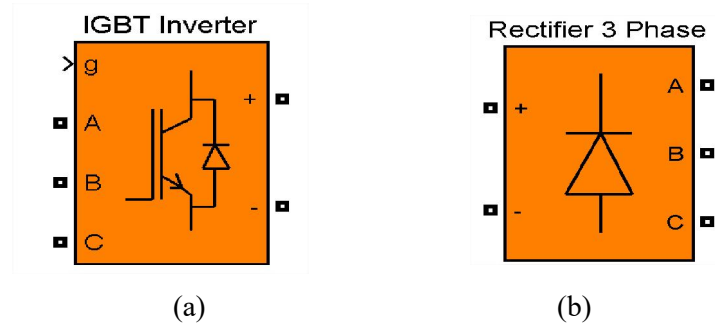


b. Blok parameter motor induksi

Gambar 3. 3. Blok konfigurasi dan parameter motor induksi pada MATLAB

3.6.2 Penyearah 3 fasa dan Inverter 3 fasa

Pengaturan kecepatan/kecepatan untuk sebuah motor listrik memerlukan *Power Electronic Konverter* yang terdiri dari penyearah 3 fasa untuk mengubah tegangan AC ke DC dan Inverter 3 fasa digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC.

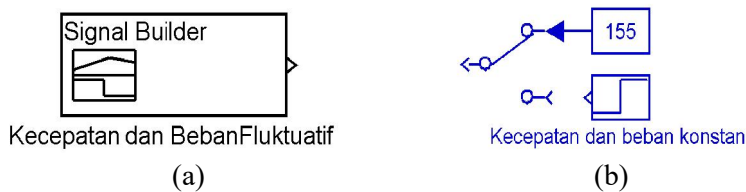


Gambar 3. 4. Inverter IGBT 3 Fasa (a) Penyearah 3 fasa (b)

Pada *library* Matlab, inverter dan penyearah 3 fasa yang ditunjukkan pada gambar 3.4, blok tersebut adalah *Universal Bridge* yang didalamnya dapat diatur menjadi penyearah 3 fasa atau inverter IGBT dengan mengganti parameter power electronic device.

3.6.3 Kecepatan Referensi dan Beban

Sistem pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa ini di variasikan menjadi 3 bagian yaitu kecepatan rendah 50 rad/sec, kecepatan menengah 100 rad/sec, kecepatan tinggi 140 rad/sec dan dibebani dengan 3 variasi, pembebanan torsi rendah sebesar 100 Nm, torsi menengah sebesar 500 Nm, torsi tinggi sebesar 900 Nm.

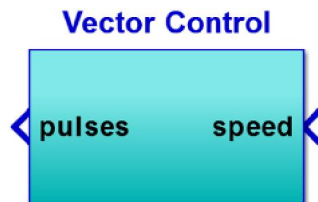


Gambar 3. 5.Signal Builder (a) Constan dan Step (b)

Untuk mengatur variasi kecepatan atau beban digunakan blog diagram pada Matlab *library* yaitu *Signal Builder* yang tunjukkan pada gambar 3.5 (a) , kemudian pada gambar 3.5 (b) untuk kecepatan konstan dan beban konstan menggunakan *Constant* dan *Step* yang ada Matlab *library*.

3.6.4 Pemodelan Vector Control

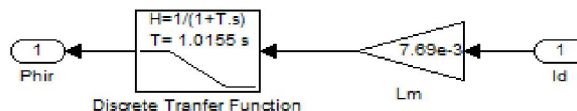
Pada pemodelan *vector control* ini merupakan penghubung antara pengaturan vektor tegangan dengan PWM sebagai pengatur amplitudo dan frekuensi yang terdapat pada inverter. Hal ini berfungsi sebagai pengatur penyalan IGBT yang ada pada inverter sehingga didapatkan frekuensi yang diinginkan untuk memutar motor induksi tiga fasa. Gambar 3.6 menunjukkan *vector control* yang digunakan di *SimPowerSystems™ library*, untuk rangkaian *vector control* seperti terlihat dalam Gambar 3.7..



Gambar 3. 6. Pemodelan vector control

Ada pun beberapa blok yang terdapat pada rangkaian *vector control* antara lain.

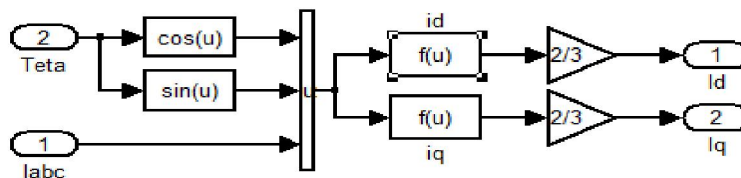
a. Perhitungan Fluks rangkaian vector control



Gambar 3. 7 blok diagram fluks

Pada tahap ini, akan dihitung nilai dari fluks. Pada blok diagram tersebut diatas, diperlukan nilai arus sumbu d dan nilai dari *mutual inductance* L_m . Nilai fluks dihitung berdasarkan diferensial dari perkalian antara arus sumbu d dengan Induktansi motor.

b. Konversi Arus motor kedalam koordinat dq

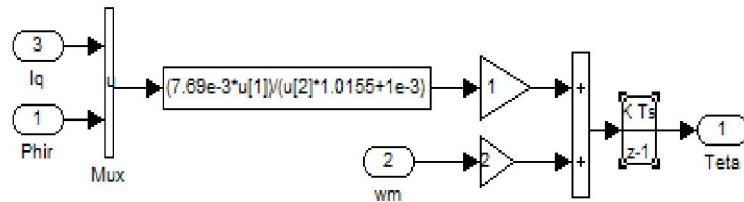


Gambar 3. 8 blok diagram konversi arus

Arus keluaran motor yang memiliki koordinat abc dikonversi kedalam arus sumbu dq . Dalam proses konversi tersebut membutuhkan komponen teta atau sudut fasa. Konversi ini menggunakan persamaan matriks.

Besarnya sudut fasa akan dipengaruhi oleh fluks rotor dan kecepatan aktual pada motor.

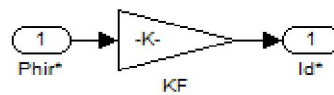
c. Perhitungan teta (Θ)



Gambar 3. 9 blok diagram sudut fasa

Nilai dari sudut fasa diperlukan pada tahap konversi arus abc kedalam arus dq. Untuk menghitung besarnya nilai teta diperlukan tiga komponen yaitu arus q, fluks rotor, serta kecepatan motor. Teta merupakan integral dari penjumlahan kecepatan mekanik rotor dengan frekuensi rotor.

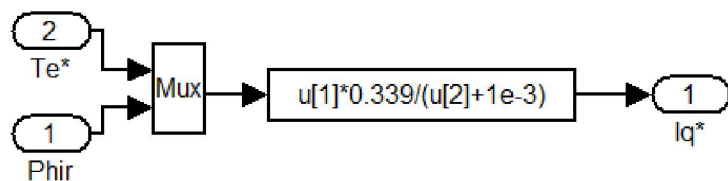
d. perhitungan arus d referensi



Gambar 3. 10 Blok diagram arus d referensi

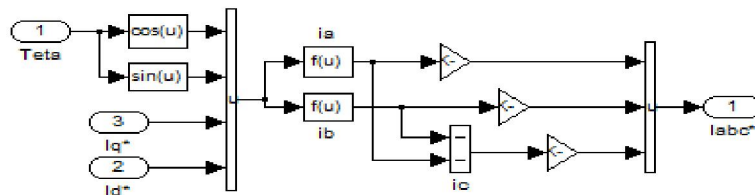
Besarnya nilai arus d referensi akan bergantung pada nilai fluks dan induktansi motor. Nilai induktansi motor diperoleh dari data parameter motor induksi. Sehingga Nilai dari KF ialah $1/7.69e-3$

e. Perhitungan arus q referensi



Gambar 3. 11 blok diagram arus q referensi

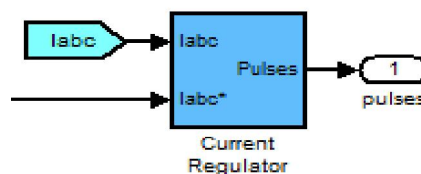
Nilai dari arus q ini akan bergantung pada besarnya fluks rotor dan torsi referensi. Dalam sistem ini, torsi referensi merupakan keluaran dari pengendali PI atau jaringan saraf tiruan. Sehingga besarnya nilai torsi ini akan bergantung dari kinerja pengendali. Oleh karena itu, nilai dari arus q dapat diatur. Sedangkan besarnya nilai fluks akan bergantung pada arus d .

f. Konversi arus abc kedalam arus sumbu dq 

Gambar 3. 12 blok diagram konversi arus

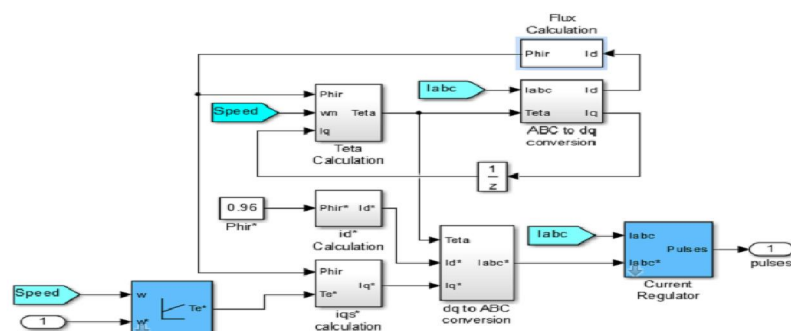
Pada dasarnya sistem vector kontrol dilakukan dengan menghitung arus dq untuk menentukan besarnya fluks dan sudut fasa pada motor. Ketika perhitungan tersebut telah selesai dilakukan maka nilai arus dq yang diperoleh harus dikonversi kembali kedalam koordinat tiga fasa abc , hal ini dikarenakan motor induksi tidak dapat dikendalikan melalui arus sumbu orthogonal dq . Proses konversi membutuhkan nilai sudut fasa dan dilakukan melalui persamaan matriks.

g. Regulator Arus



Gambar 3. 13 blok diagram regulator arus

Pada proses ini akan dijumlahkan antara arus perhitungan dengan arus aktual pada motor. Besarnya nilai arus akan dibatasi oleh arus *Hysteresis Band*. hasil perpotongan antara kurva arus motor dengan kurva *Hysteresis Band* akan menentukan kinerja *on/off* dari *relay*. Keluaran dari regulator arus ini akan dihasilkan enam buah pulsa yang nantinya digunakan untuk mengatur *gate* pada inverter IGBT.

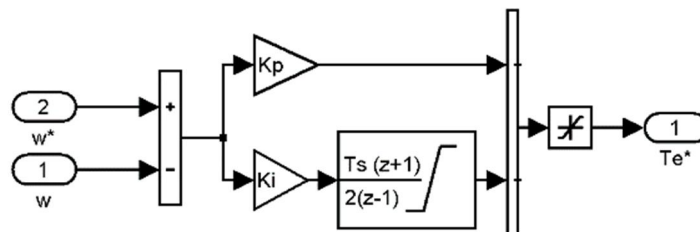


Gambar 3. 14. Blok rangkaian vector control matlab dengan PI kontrol

3.6.4 Kontroller PI

Setelah rangkaian selesai disusun, simulasi dilakukan pada simulink untuk mendapatkan parameter pengendali PI yang mampu menghasilkan kecepatan yang paling akurat.

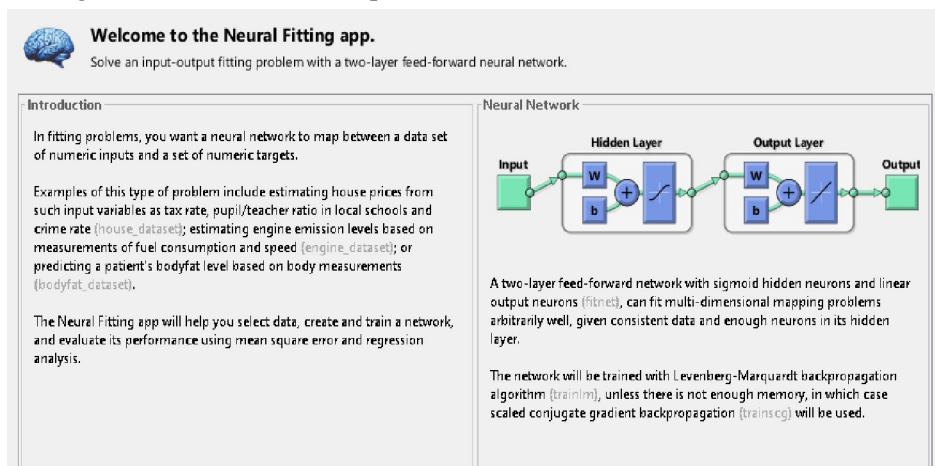
Kontrol PI menerima masukan dari masing-masing variasi kecepatan referensi dan kecepatan actual, untuk menunjukkan data hasil kontrol PI digunakan blok diagram *Workspace* pada *Matlab library*. Kontrol PI pada penelitian ini dipilih karena keunggulannya dalam proses pengontrolan yang mampu mempercepat sistem menuju ke keadaan steady state.



Gambar 3. 15. Kontroller PI

3.6.5 Kontroller JST

Kontroller JST disusun dengan melakukan pelatihan pada data secara bertahap. Setelah memperoleh data dari kontrol PI. Tahap awal yang harus dilakukan adalah membentuk terlebih dahulu Jaringan Saraf Tiruan menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), pada gambar .3.16 berikut tampilan dari nftool.

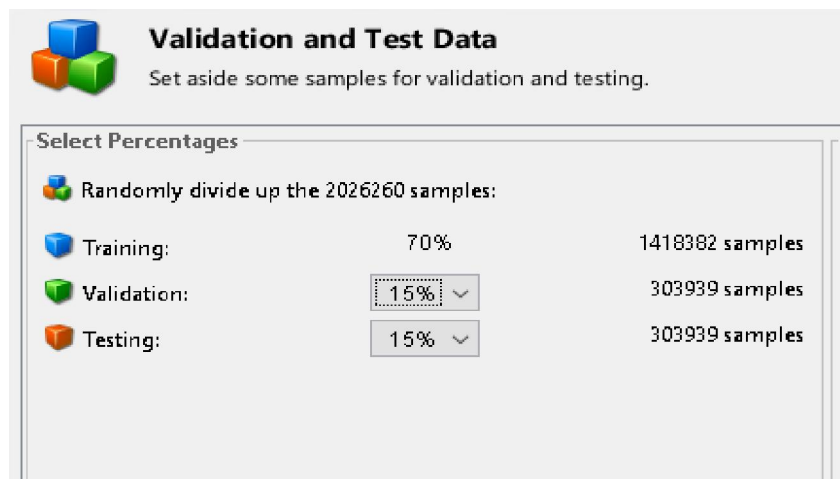


Gambar 3. 16. Neural network fitting tool

Neural network fitting tool bekerja dengan memilih data, membuat dan melatih jaringan, dan mengevaluasi kinerjanya dengan perbedaan kuadrat

rata-rata antara keluaran dan target (*mean square error*). Hal tersebut sesuai dengan metode propagasi balik (*backpropagation*) dimana pelatihan terdiri dari pasangan *input* dan *output* target kemudian menghasilkan *output* aktual yang selanjutnya *ouput* aktual jaringan di bandingkan dengan *output* target untuk mengetahui apakah *output* jaringan sudah sesuai dengan harapan (*output* actual sudah sama dengan *output* target). Untuk lebih jelasnya berikut adalah langkah-langkah yang digunakan dalam membentuk jaringan syaraf tiruan menggunakan Syntax program nftool :

1. Tentukan *Input* dan *Target* yang akan di gunakan sebagai pelatihan jaringan saraf tiruan
Pelatihan untuk pengendali berbasis jaringan saraf tiruan didapat dengan terlebih dahulu memasang pengendali PI, kemudian mencari secara manual parameter PI yang terbaik untuk setiap kondisi kecepatan.
2. Tentukan *sample* data untuk pelatihan, validasi dan *testing*
Penentuan sample yang di pilih adalah 70% untuk data pelatihan, 15% untuk validasi dan 15% untuk *testing*



Gambar 3. 17. Penentuan sample pelatihan

Training: mempresentasikan jaringan selama pelatihan, dan jaringan disesuaikan sesuai dengan error.

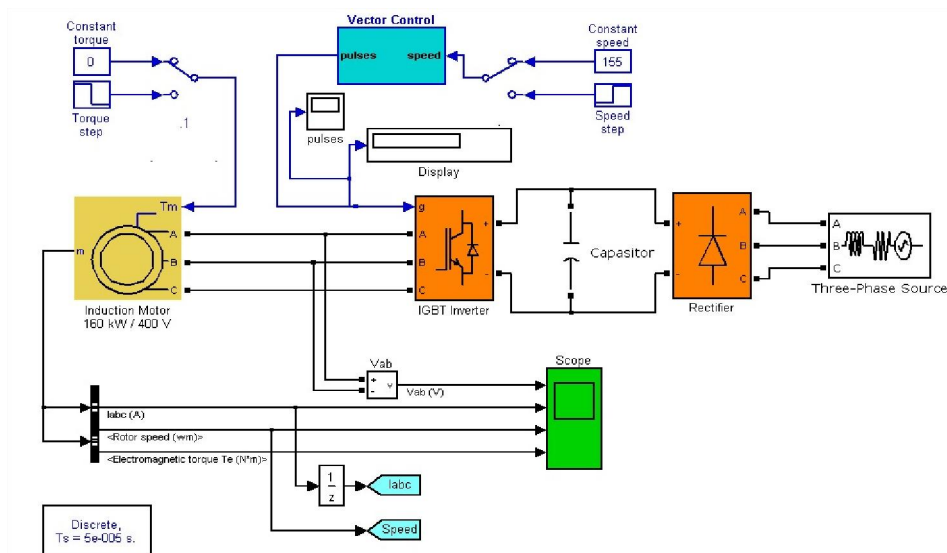
Validation ; Ini digunakan untuk mengukur generalisasi jaringan, dan untuk menghentikan pelatihan saat generalisasi berhenti membaik.

Testing : Ini tidak berpengaruh pada pelatihan sehingga memberikan ukuran kinerja jaringan yang independen selama dan setelah pelatihan

3. Tetapkan jumlah lapisan tersembunyi (HiddenLayer)
Lapisan tersembunyi dapat diatur dari 1 sampai 10 buah, jumlah lapisan tidak menentukan hasil dari pelatihan jaringan saraf tiruan. Pada tugas akhir ini akan di lakukan pelatihan jaringan saraf tiruan dari 1 sampai 10 lapisan tersembunyi untuk mendapatkan nilai error terkecil.
4. Latih jaringan agar sesuai *Input* dan Target
Hal yang akan dipertimbangkan dalam pelatihan kali ini adalah
 - a. *Epoch* : siklus pola pelatihan yang dilakukan pada pelatihan jaringan saraf tiruan nftool dengan maksimal 1000 *epoch*
 - b. *Performance* : perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target (mean square error).
 - c. Gradient : Menunjukkan hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target
 - d. Validation Check : menghentikan pelatihan saat generalisasi berhenti membaik
5. Pelatihan kembali pada jaringan saraf tiruan,
Pelatihan berkali-kali akan menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda.

3.6.6 Sistem Keseluruhan

Dari blok-blok tersebut maka dapat dirangkai sebuah simulasi sistem kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa dengan kontrol jaringan syaraf



Gambar 3. 18. Rangkaian Pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa

BAB IV PEMBAHASAN

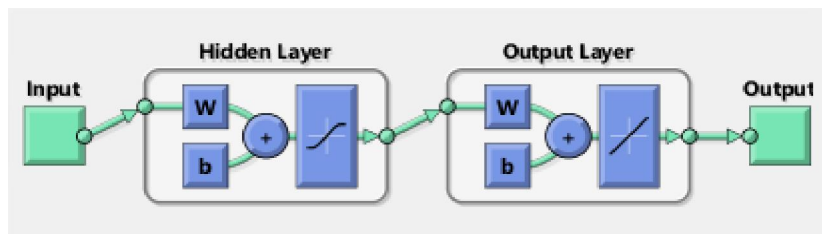
4.1. Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Sebelum pelatihan kontrol jaringan saraf tiruan terlebih dahulu memasang pengendali PI (*Proportional gain* “Kp” dan *Integral gain* “Ki”), kemudian mencari secara manual parameter Kp dan Ki yang terbaik untuk setiap kondisi kecepatan. lalu mengambil data masukan dan keluaran dari kontroler PI tersebut sebagai data pelatihan. Berikut adalah nilai Kp dan Ki pada kontrol PI yang di dapatkan pada setia variasi kecepatan

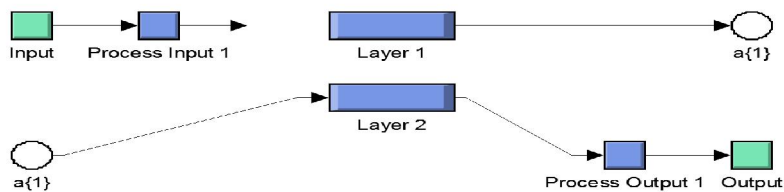
Tabel 4. 1 .Nilai P dan I pada setiap kecepatan dan beban

Variasi Kecepatan (rad/detik)	Beban (Nm)	Parameter Kontrol		Kecepatan Terukur (rad/sec)	Waktu naik (detik)	Waktu tetap (detik)
		Kp	Ki			
50	0	25	1	49.92	0.7	1
	100	150	0.5	100.2	0.3	0.35
	500	570	3	49.11	0.33	0.34
	900	1120	3	49.28	1.28	1.3
100	0	24	0.5	100.2	1.2	1.5
	100	360	0.5	99.82	0.38	0.5
	500	780	3	99.36	0.6	0.7
	900	1300	3	99.59	2.5	2.55
140	0	40	0.5	140	0.8	1.6
	100	450	0.5	140	0.48	0.5
	500	960	3	140	0.82	0.9
	900	1400	0.5	139.8	3.58	3.6

Pada pelatihan dengan menggunakan *syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*) dihasilkan jaringan dua lapisan layer, dengan layer pertama yaitu lapisan tersembunyi (hidden layer) yang dapat di ubah dan neuron keluaran linier. Pada gambar 4.1 di perlihatkan struktur jaringan yang dihasilkan pada pelatihan program nftool



(a)



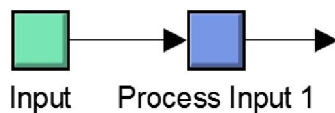
(b)

Gambar 4. 1. Diagram blok JST *fitting tool* (a), Struktur JST *fitting tool*

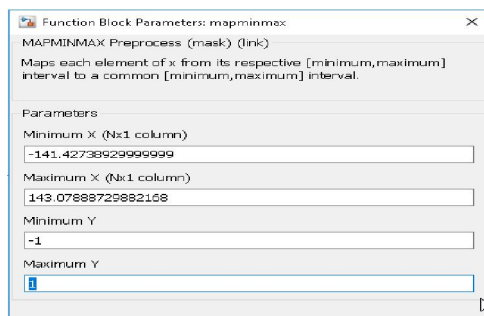
Komponen jaringan hasil nftool (*neural natwork fitting tool*) adalah sebagaiberikut :

1. *Input* proses

Struktur pertama dalam jaringan, terdiri dari input atau nilai masukkan yang di dapatkan dari kontrol PI, komponen ini mempunyai nilai maksimum dan minimum yang di targetkan pada proses pembelajaran/pelatihan jaringan



(a)

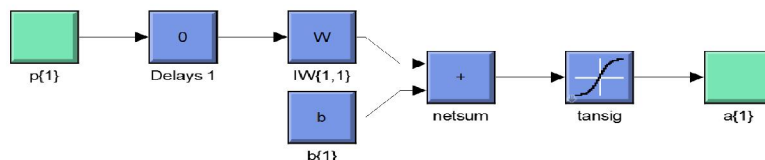


(b)

Gambar 4. 2. Proses input (a), Block parameter input (b)

2. Layer pertama (Lapisan Tersembunyi)

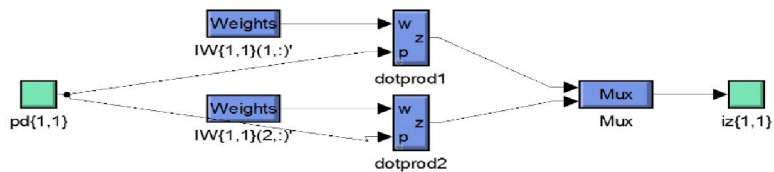
Pada layer 1 memiliki beberapa unit yang ada dalam satu bagian, yang pertama adalah sebuah layar tersembunyi *Weight* (bobot) merupakan nilai matematis dari koneksi, yang mentransfer data ke lapisan lainnya.



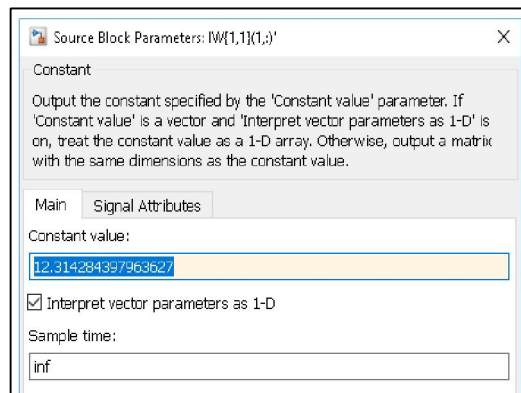
Gambar 4. 3. Susunan Layer pertama

Bobot ini digunakan untuk mengatur jaringan sehingga menghasilkan output sekaligus membuat jaringan tersebut belajar, jumlahnya dapat di atur dari 1-10 dan “b unit” adalah sebuah bias yang memang secara langsung terbentuk. Jumlah dari lapisan tersembunyi (w unit) tidak menentukan hasil dari kontrol

jaringan, oleh sebab itu pada tugas akhir kali ini akan di cari hasil dari setiap lapisan tersembunyi sehingga di dapatkan kontrol (nilai error) terbaik.



Gambar 4. 4. Jumlah lapisan tersembunyi

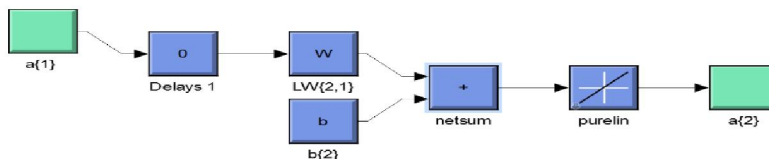


Gambar 4. 5. Nilai dari setiap bobot lapisan tersembunyi

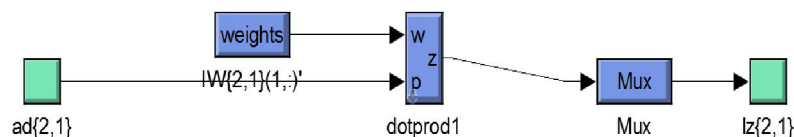
Nilai bobot dari hasil pelatihan jaringan saraf tiruan untuk setiap lapisan tersembunyi di lihat pada *source block parameter* gambar 4.4 (c).

3. Layer 2 (Lapisan Output)

Lapisan ini merupakan output jaringan saraf tiruan terhadap suatu permasalahan atau *output* aktual, *error* yang timbul akibat perbedaan antara output actual dengan *output* target tersebut kemudian dihitung dan di gunakan mengupdate bobot-bobot pada layer 1.



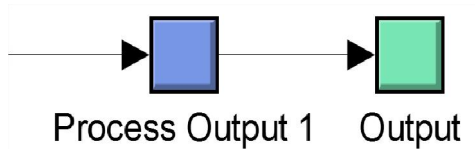
Gambar 4. 6. Susunan Layer ouput



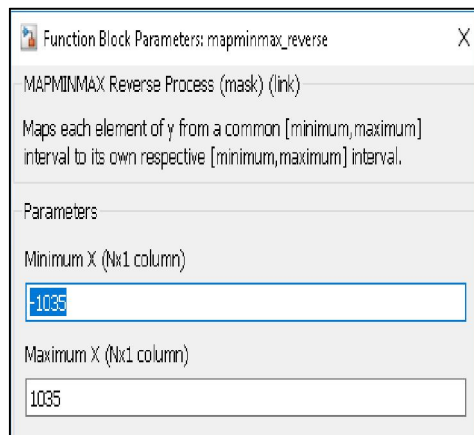
Gambar 4. 7. Bobot lapisan output

4. Output Proses

Nilai target atau *output* target yang di dapatkan dari kontrol PI, komponen ini mempunyai nilai maksimum serta minimum yang di targetkan pada proses pembelajaran/pelatihan jaringan dan sebagai pembanding dengan output aktual hasil dari keluaran jaringan



Gambar 4. 8 . Struktur proses output



Gambar 4. 9. Block parameter input

Pelatihan data menggunakan kontroller JST diatur dengan besar error 10^{-5} , dengan jumlah pengulangan yang diatur sebanyak 1000 iterasi. Pengaturan ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal dengan error yang paling kecil.

4.2.1 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 1 Lapisan Tersembunyi

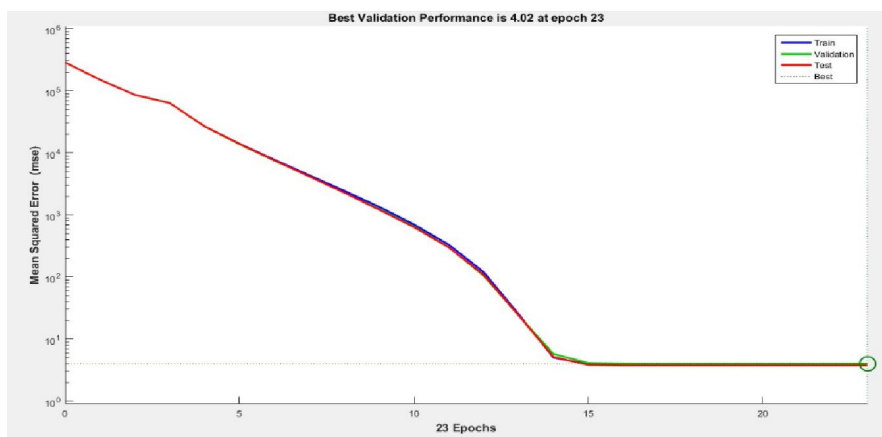
Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari kontroller PI menggunakan *Syntax* program *nftool* (*Neural network fitting tool*) dengan 2 layer, pelatihan dilakukan dengan 1 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil.

Tabel 4. 2.Nilai error JST 1 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	3.98934
	2	3.98778
	3	3.93508
	4	3.90218

Pelatihan berkali-kali akan menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda. Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 1 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 3.9021, dengan nilai bobot sebesar 2687.34 pada lapisan tersembunyi. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool.

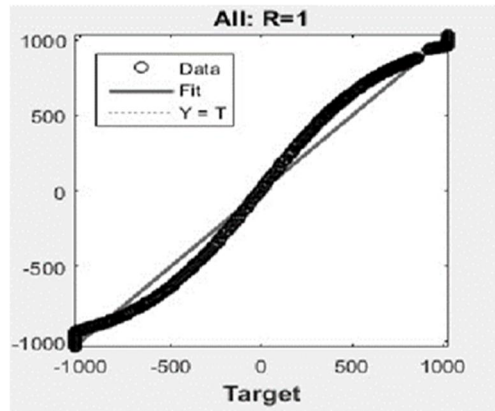
Hasil pelatihan juga menghasil grafik performa pada gambar 4.10, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 15, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 20, hal tersebut dapat di sebabkan nilai *gradient* sudah mencapai nilai maksimal.



Gambar 4. 10. Grafik *Performance* JST 1 lapisan tersembunyi

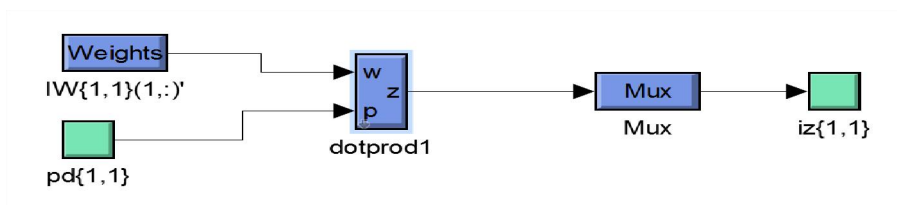
Garis berwarna biru mewakili data pelatihan, garis berwarna hijau mewakili data validasi, garis berwarna merah mewakili nilai pengujian dan garis putus-putus berwarna hitam mewakili standar nilai error terbaik yang di dapatkan. Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.11, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba

Agar sesuai, data harus jatuh sepanjang garis 45 derajat, di mana output jaringan sama dengan target. Garis tebal berwarna hitam adalah kumpulan data yang tersusun menjadi sebuah garis, pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Jika R mendekati nol, maka tidak ada hubungan linier antara keluaran dan target.



Gambar 4. 11. Grafik Regresion JST 1 lapisan tersembunyi

Nilai R merupakan indikasi hubungan antara keluaran dan target. Jika $R = 1$, ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Jika R mendekati nol, maka tidak ada hubungan linier antara keluaran dan target. Berikut struktur jaringan saraf tiruan 1 lapisan tersembunyi



Gambar 4. 12. Struktur jaringan saraf tiruan 1 lapisan tersembunyi

4.2.2 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 2 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari kontroller PI menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural natwork fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 2 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

Tabel 4. 3 Nilai error JST 2 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	3.81539
	2	3.86029
	3	3.88671
	4	3.90734

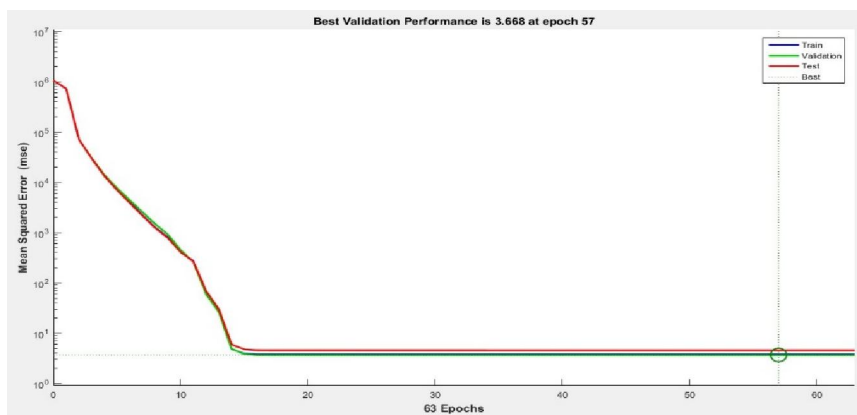
Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 2 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 3.907, nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program

nftool. Nilai bobot lapisan tersembunyi pada masing-masing lapisan dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut ini

Tabel 4. 4. Nilai bobot 2 lapisan tersembunyi

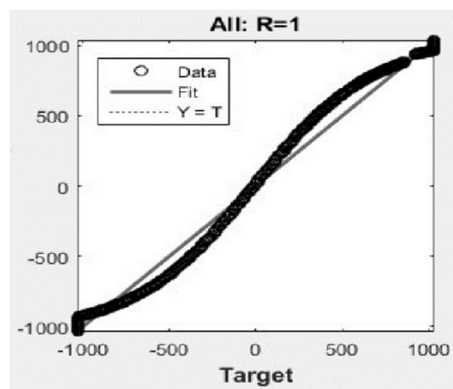
Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	-0.20185
2	-2678.3652

Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.14, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 15, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 63, hal tersebut dapat disebabkan nilai *validation checks* sudah mencapai nilai maksimal.



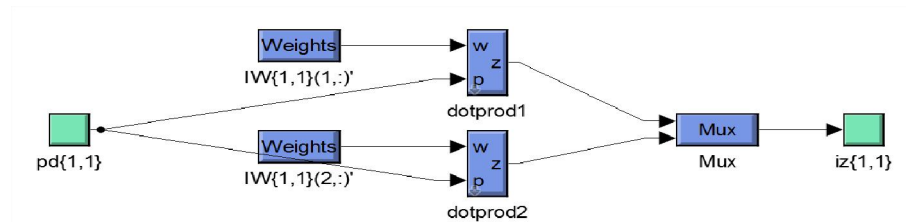
Gambar 4. 13 Grafik *Performance* JST 2 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.13, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba



Gambar 4. 14 Grafik Regeresion

Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target, akan tetapi masih ada data yang belum sesuai dengan nilai target.



Gambar 4. 15 Struktur jaringan saraf tiruan 2 lapisan tersembunyi

4.2.3 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 3 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 3 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

Tabel 4.5 Nilai error JST 2 lapisan tersembunyi

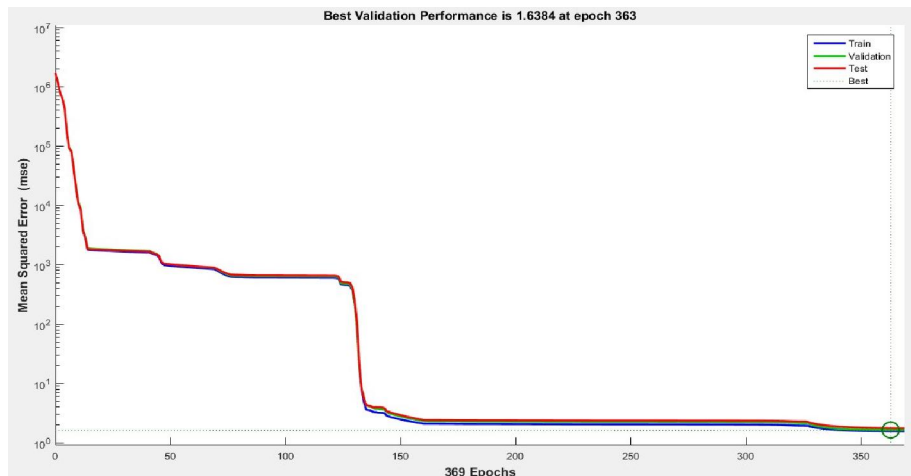
	Pelatihan	Error
Layer	1	3.8157
	2	2.1167
	3	2.1683
	4	1.5632

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 3 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.563, nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Nilai bobot lapisan tersembunyi pada masing-masing lapisan dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut ini

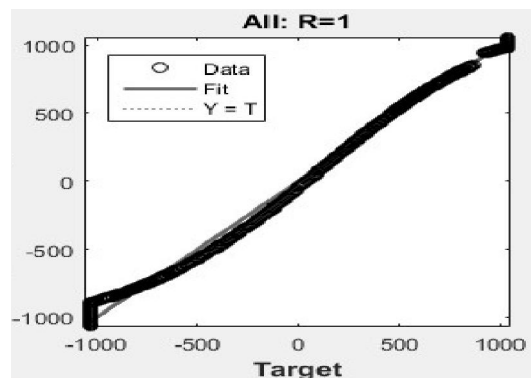
Tabel 4.6 Nilai bobot 3 lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	1143.932
2	-1141.463
3	-1473.156

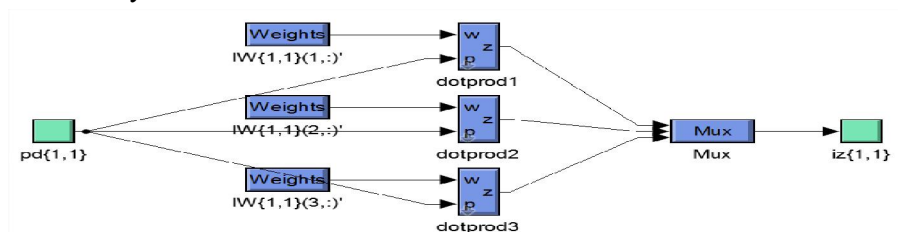
Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.16, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 330, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 369, hal tersebut dapat di sebabkan nilai *validation checks* sudah mencapai nilai maksimal.



Gambar 4. 16 Grafik Performance jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi
Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.17, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba.



Gambar 4. 17Grafik Regeresion jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi
Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$, ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Grafik *regression* kali ini lebih baik dengan kecocokan data input dan target semakin membaik dari pada percobaan lapisan tersembunyi 1 dan 2



Gambar 4. 18 Struktur jaringan saraf tiruan 3 lapisan tersembunyi

4.2.4 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 4 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 4 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

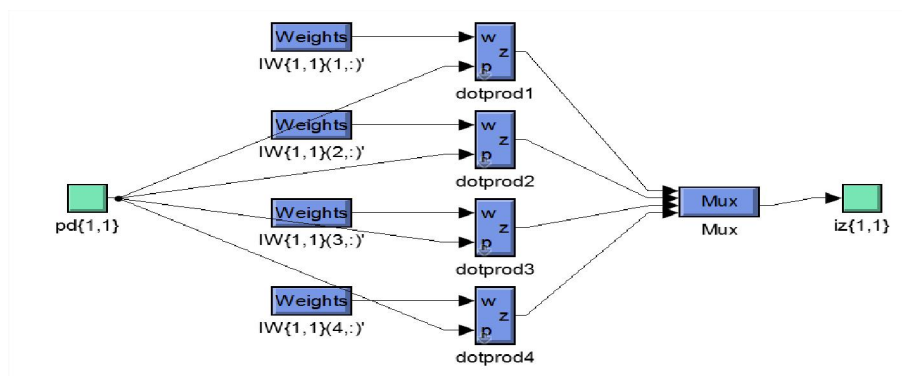
Tabel 4. 5. Nilai error JST 4 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	3.9486
	2	3.7946
	3	1.7683
	4	1.4245

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 4 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.425. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.8 berikut

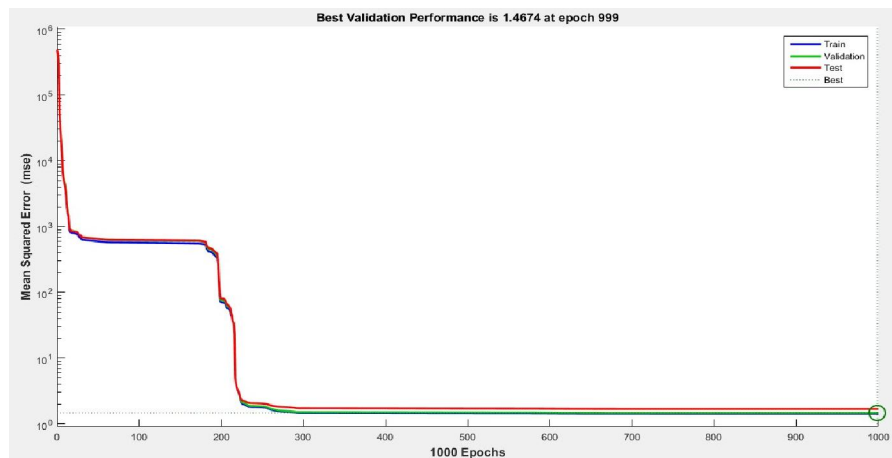
Tabel 4. 6. Nilai bobot 4 lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	1507.659
2	-1127.551
3	1079.904
4	1033.398



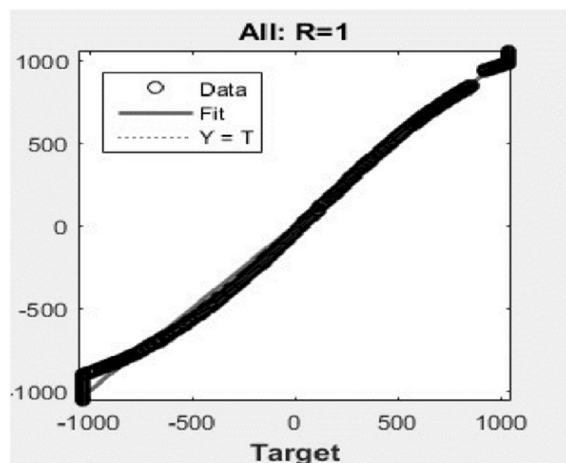
Gambar 4. 19. Struktur jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi

Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.20, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 300, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 1000, hal tersebut dapat disebabkan nilai *epochs* sudah mencapai nilai maksimal. Bila *epochs* mencapai nilai maksimal pelatihan dapat dilakukan kembali agar menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda.



Gambar 4. 20 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.21, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba



Gambar 4. 21 Grafik Regresi jaringan saraf tiruan 4 lapisan tersembunyi

Pada pelatihan kali 4 *hidden layer* nilai $R=1$, menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target.

4.2.5 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 5 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari kontroller PI menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 5 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

Tabel 4. 7 Nilai error JST 5 lapisan tersembunyi

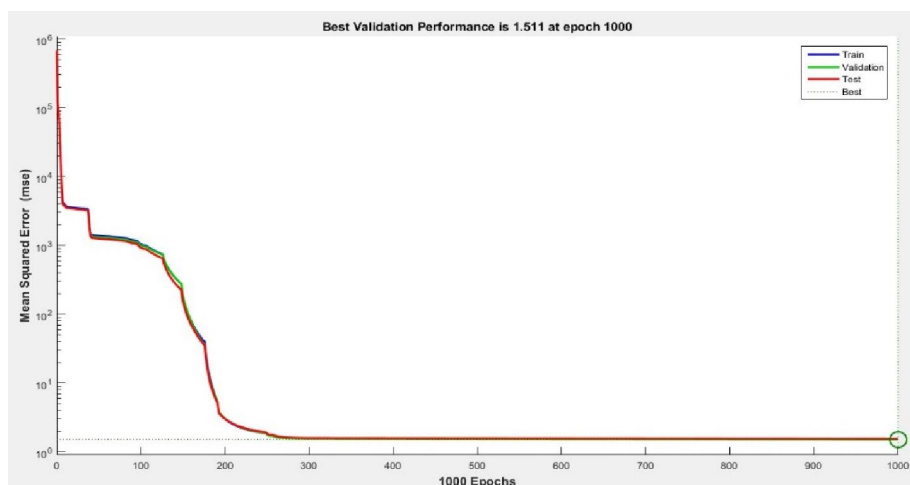
	Pelatihan	Error
Layer	1	2.0877
	2	1.8096
	3	1.6613
	4	1.5349

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 5 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.5349. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.8 berikut

Tabel 4. 8 Nilai bobot 5 lapisan tersembunyi

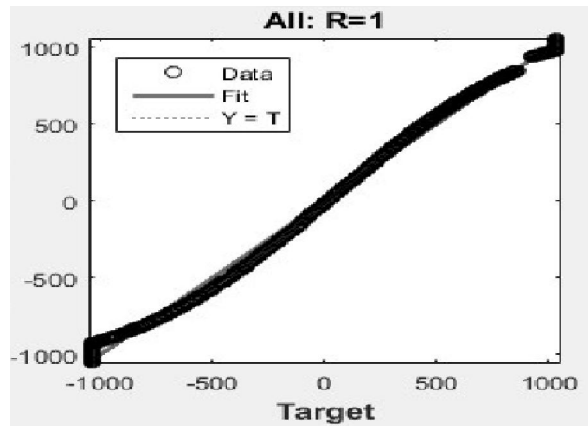
Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	116.39
2	1665.77
3	1483.51
4	745.122
5	-66.356

Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.22, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian



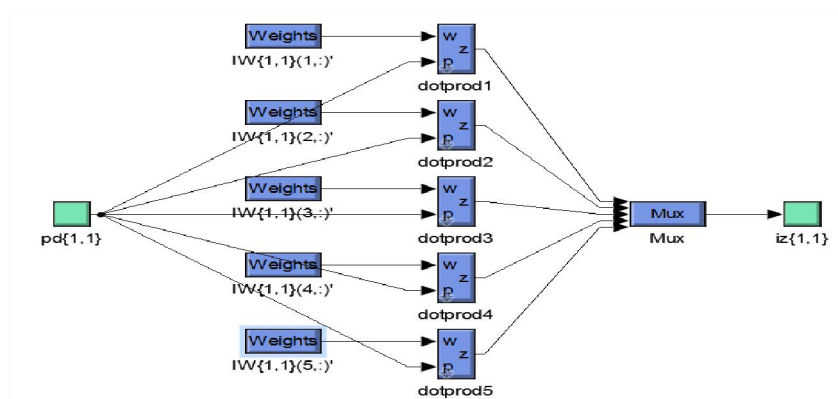
Gambar 4. 22 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi

mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 300, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 1000, hal tersebut dapat disebabkan nilai *epochs* sudah mencapai nilai maksimal. Bila *epochs* mencapai nilai maksimal pelatihan dapat dilakukan kembali agar menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda.



Gambar 4. 23 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.22, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba. Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Pada gambar 4.24 berikut ini di tampilkan struktur jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi



Gambar 4. 24 Struktur jaringan saraf tiruan 5 lapisan tersembunyi

4.2.6 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 6 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program *nftool* (*Neural network fitting tool*),

pelatihan dilakukan dengan 6 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

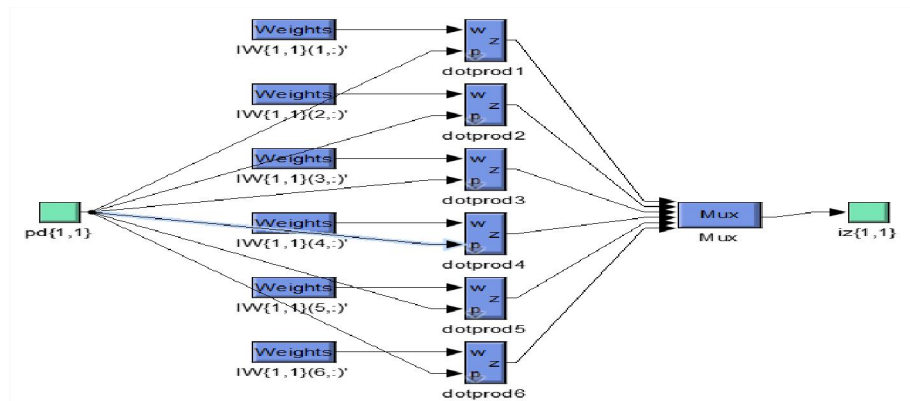
Tabel 4. 9 Nilai error JST 6 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	2.1781
	2	2.1291
	3	1.5887
	4	1.4933

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 6 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.493. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.10 berikut

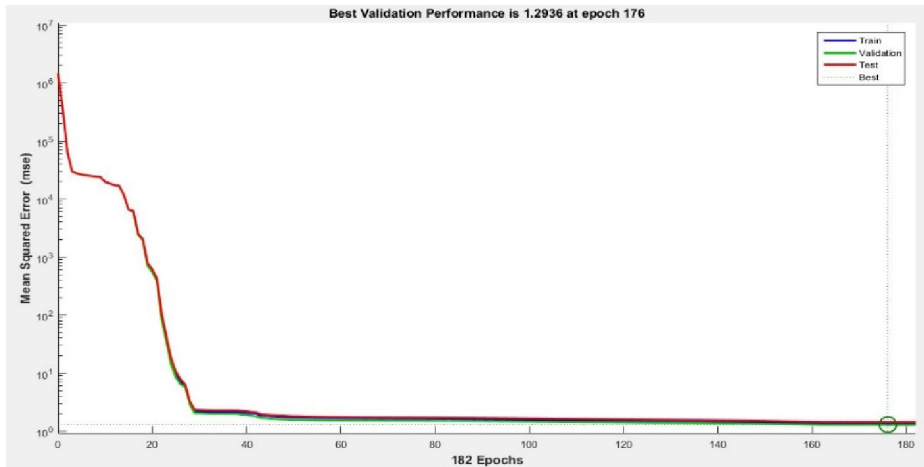
Tabel 4. 10 Nilai bobot 6 lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	-1081.951
2	-787.104
3	1228.98
4	-1028.00
5	0.76120
6	55.2345



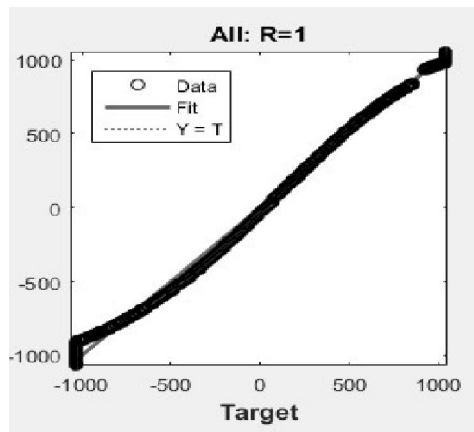
Gambar 4. 25 Struktur jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi

Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.26, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 600, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 182, hal tersebut dapat disebabkan nilai *validation checks* sudah mencapai nilai maksimal



Gambar 4. 26 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.27, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi dan uji coba. pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target



Gambar 4. 27 Grafik Regeresion jaringan saraf tiruan 6 lapisan tersembunyi

Jika R mendekati nol, maka tidak ada hubungan linier antara keluaran dan target.

4.2.7 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 7 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program *nftool* (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 7 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

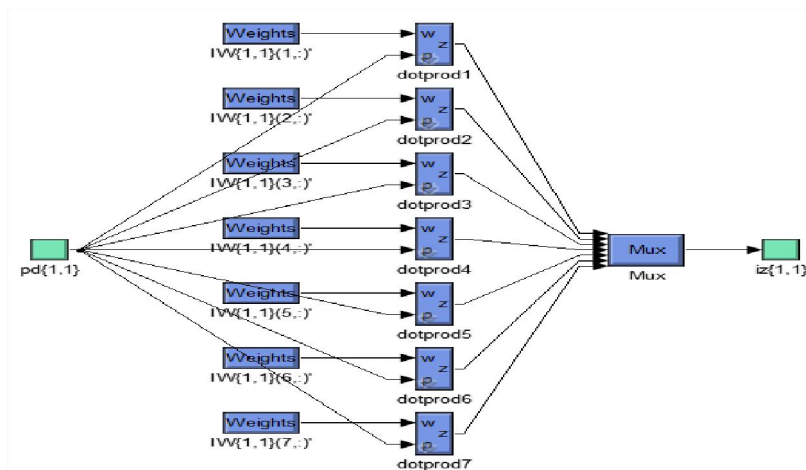
Tabel 4. 11 Nilai error JST 7 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	2.2513
	2	2.1008
	3	1.6024
	4	1.5064

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 7 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.506. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.12 berikut

Tabel 4. 12 Nilai bobot 7 lapisan tersembunyi

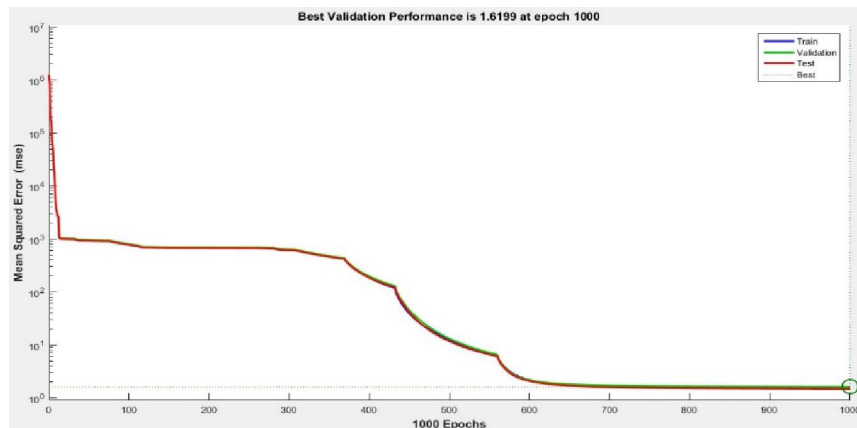
Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	-89.6105
2	469.8241
3	771.686
4	-1084.142
5	474.3536
6	-634.4804
7	449.9228



Gambar 4. 28 Struktur jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi

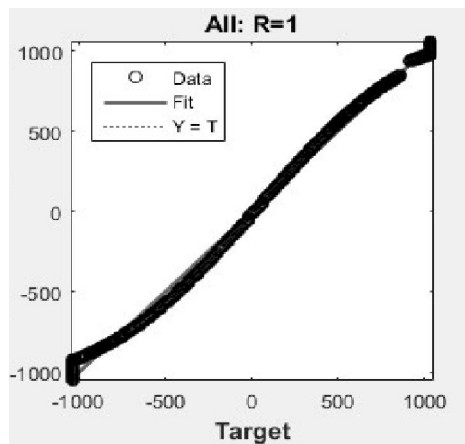
Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.29, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 700, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 1000, hal tersebut dapat di sebabkan nilai *epochs* sudah mencapai nilai maksimal. Bila *epochs* mencapai nilai maksimal

pelatihan dapat dilakukan kembali agar menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda.



Gambar 4. 29 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.30, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba



Gambar 4. 30 Grafik Regeresion jaringan saraf tiruan 7 lapisan tersembunyi

Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target.

4.2.8 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 8 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program *nftool* (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 8 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

Tabel 4. 13 Nilai error JST 8 lapisan tersembunyi

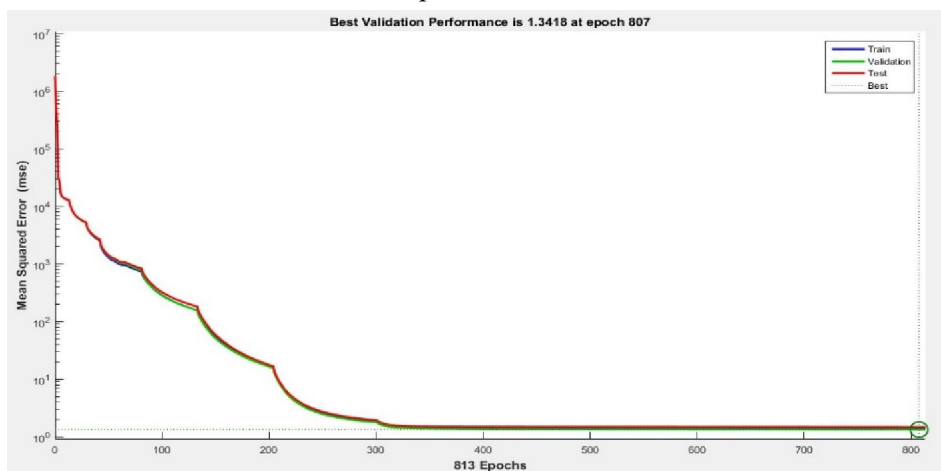
	Pelatihan	Error
Layer	1	2.0364
	2	1.7977
	3	1.7729
	4	1.4486

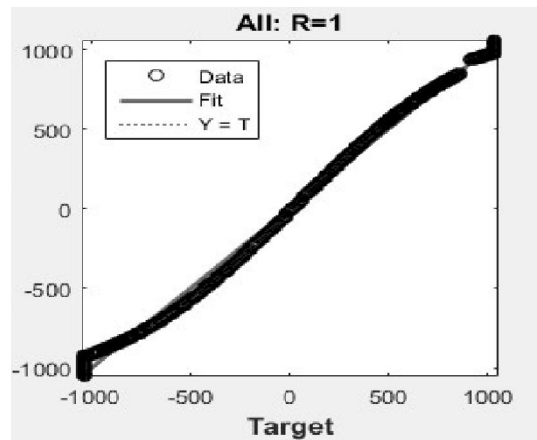
Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 8 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.4486. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.14 berikut

Tabel 4. 14 Nilai bobot 8 lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	13.5270
2	160.861
3	-632.596
4	1010.12
5	937.330
6	1024.62
7	691.578
8	-200.387

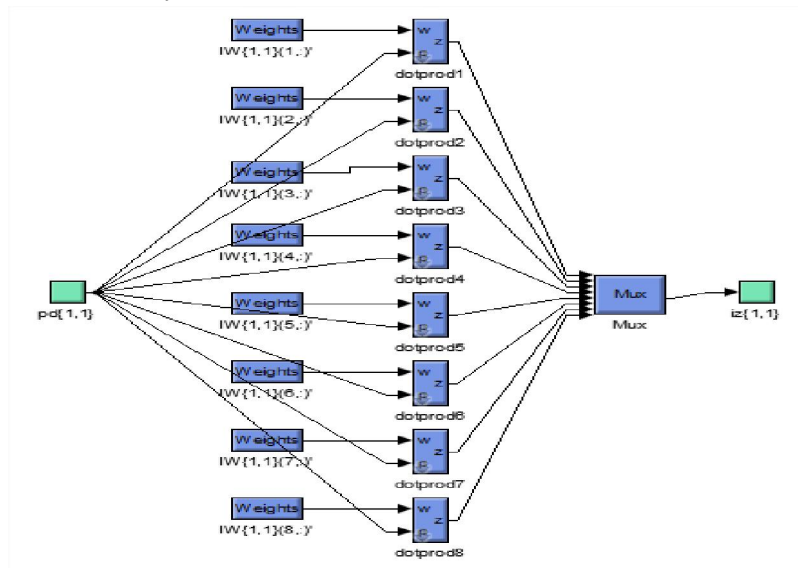
Hasil pelatihan juga menghasil grafik performa pada gambar 4.31, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan,validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 400, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 813, hal tersebut dapat di sebabkan nilai validation checks sudah mencapai nilai maksimal.

Gambar 4. 31 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi



Gambar 4. 32 Grafik Regeresion jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.32, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba. Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Berikut struktur jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi



Gambar 4. 33 Struktur jaringan saraf tiruan 8 lapisan tersembunyi

4.2.9 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 9 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari controller PI menggunakan *Syntax* program *nftool* (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 9 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

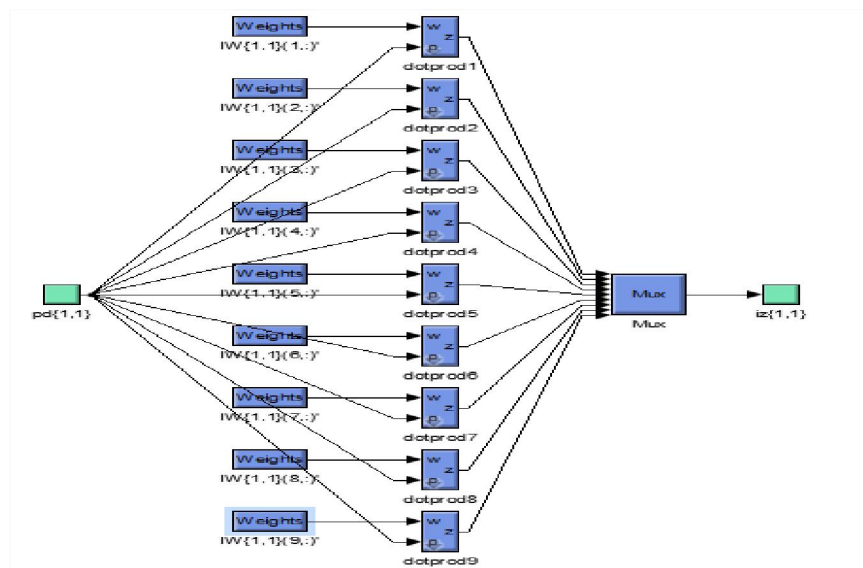
Tabel 4. 15 Nilai error JST 9 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	1.9521
	2	1.5855
	3	1.6206
	4	1.4477

Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 9 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.4477. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.16 berikut

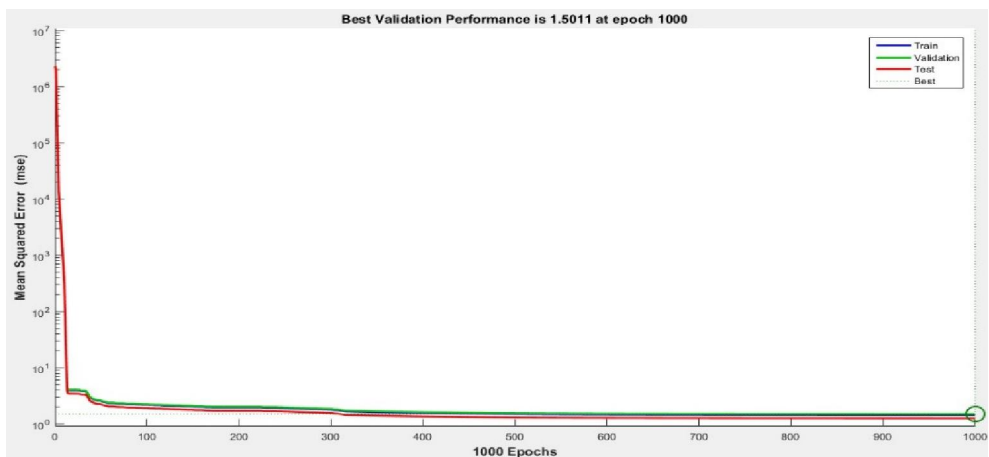
Tabel 4. 16 Nilai bobot 9 lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	-12.8460
2	697.605
3	788.737
4	664.626
5	-926.402
6	-11.5942
7	-1033.121
8	37.3130
9	-12.5840



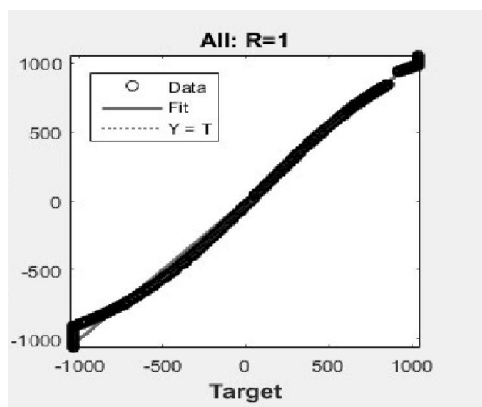
Gambar 4. 34 Struktur jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi

Hasil pelatihan juga menghasilkan grafik performa pada gambar 4.35, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 400, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 1000, hal tersebut dapat disebabkan nilai *epochs* sudah mencapai nilai maksimal. Bila *epochs* mencapai nilai maksimal pelatihan dapat dilakukan kembali agar menghasilkan hasil yang berbeda karena kondisi awal dan sampling yang berbeda.



Gambar 4. 35 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi

Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.36, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba



Gambar 4. 36 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 9 lapisan tersembunyi

Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target.

4.2.10 Struktur Kontrol Jaringan Saraf Tiruan dengan 10 Lapisan Tersembunyi

Pelatihan dilakukan dengan melatih data yang diperoleh dari kontroller PI menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), pelatihan dilakukan dengan 10 lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Kemudian dilakukan pelatihan hingga memiliki nilai error terkecil

Tabel 4. 17 Nilai error JST 10 lapisan tersembunyi

	Pelatihan	Error
Layer	1	2.2669
	2	1.5084
	3	1.4720
	4	1.4173

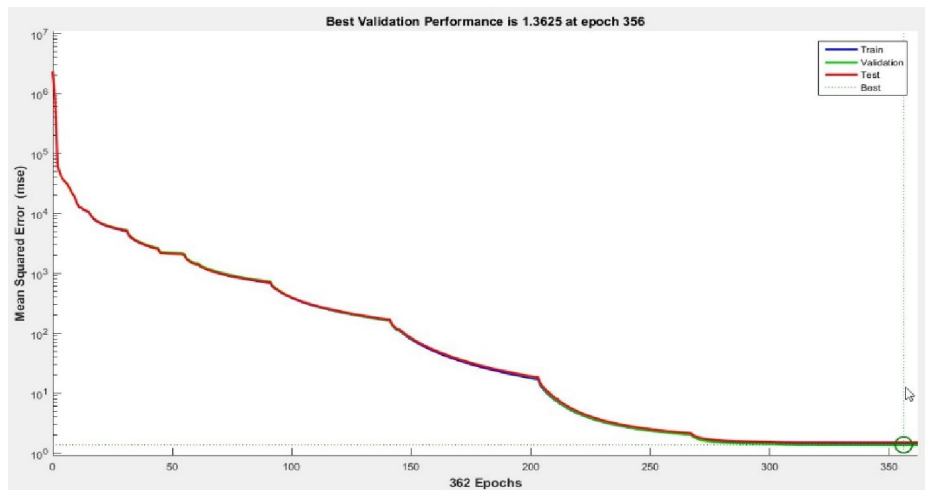
Dari 4 kali pelatihan JST menggunakan 10 layer tersembunyi di dapat nilai error terbaik adalah 1.4173. Nilai error tersebut adalah perbedaan kuadrat rata-rata antara keluaran dan target yang di hasilkan dari pelatihan program nftool. Untuk nilai bobot lapisan tersembunyi di perlihatkan pada Tabel 4.18 berikut

Tabel 4. 18 Nilai bobot 10 lapisan tersembunyi

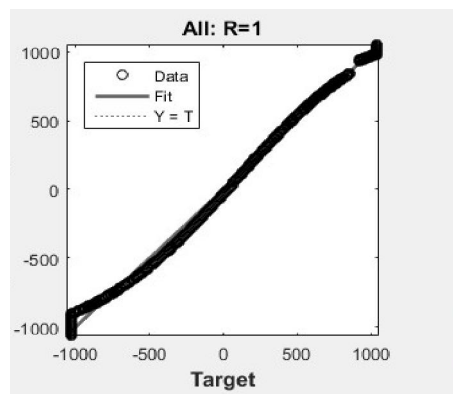
Lapisan Tersembunyi	Nilai
1	-55.250
2	118.830
3	-175.044
4	85.6787
5	-1231.56
6	-1141.04
7	1086.04
8	-665.339
9	-19.1363
10	19.21441

Hasil pelatihan juga menghasil grafik performa pada gambar 4.37, di ketahui pada grafik tersebut bahwa nilai pelatihan, validasi dan pengujian mulai mendekati nilai error terbaik pada *epochs* (siklus pola pelatihan) ke 300, pelatihan berakhir pada *epochs* ke 362, hal tersebut dapat di sebabkan nilai *validation checks* sudah mencapai nilai maksimal

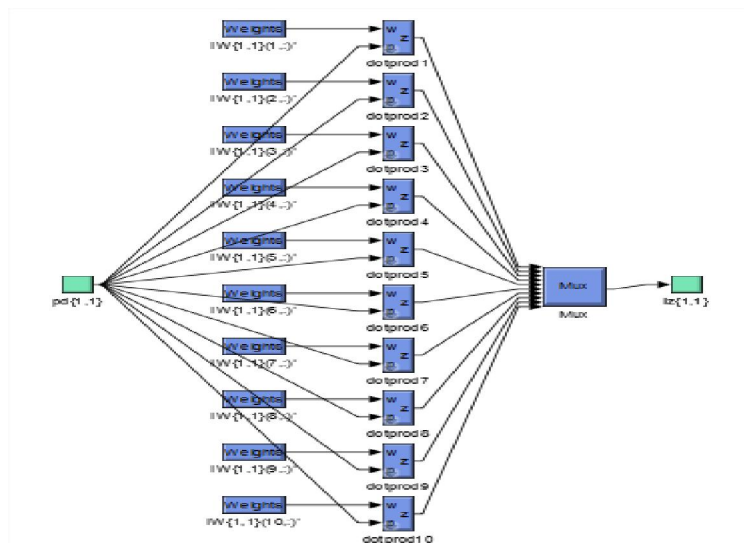
Kemudian grafik plot regresi pada gambar 4.38, grafik tersebut menampilkan nilai keluaran jaringan sehubungan dengan target pelatihan, validasi, dan uji coba. Pada pelatihan ini kecocokan cukup baik untuk semua kumpulan data dimana nilai $R=1$ ini menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang tepat antara keluaran dan target. Jika R mendekati



Gambar 4. 37 Grafik *Performance* jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi



Gambar 4. 38 Grafik Regresion jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi



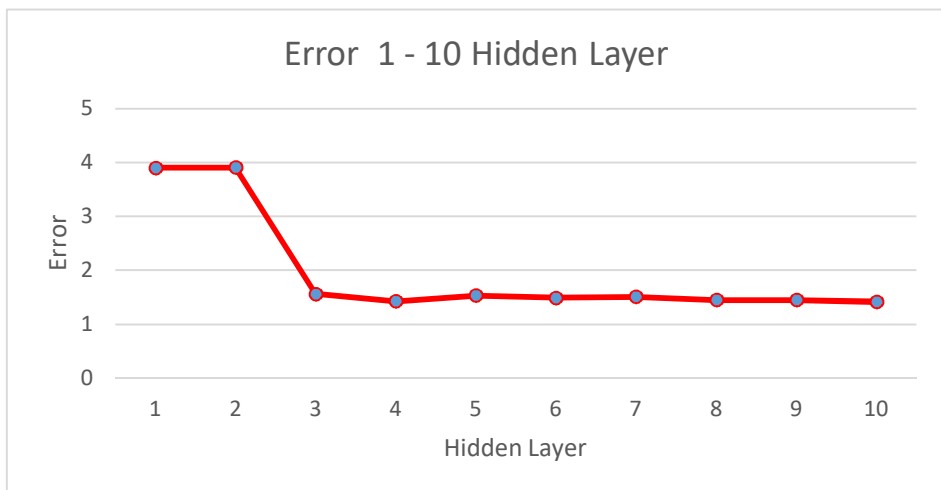
Gambar 4. 39 Struktur jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi

4.2.11 Kontrol Jaringan Saraf Tiruan Terbaik

Jaringan saraf tiruan yang melalui proses pembelajaran menggunakan *Syntax* program nftool (*Neural network fitting tool*), dengan 1 sampai 10 lapisan tersembunyi (*hidden layer*) kemudian di cari nilai error terkecil dari setiap variasi lapisan tersembunyi yang di latih. Hasil dari setiap pelatihan dengan 1 sampai 10 lapisan tersembunyi menghasilkan nilai error yang berbeda untuk nilai dari setiap lapisan tersembunyi dapat dilihat pada tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Hasil error JST setiap lapisan tersembunyi

Lapisan Tersembunyi	Error	Epochs	Pelatihan Berhenti	Nilai Plot regresi
1	3.9021	20	Gradient	1
2	3.9073	63	Validation	1
3	1.5632	369	Validation	1
4	1.4245	1000	Epochs	1
5	1.5349	1000	Epochs	1
6	1.4933	182	Validation	1
7	1.5065	1000	Epochs	1
8	1.4486	813	Validation	1
9	1.4477	1000	Epochs	1
10	1.4173	362	Validation	1



Gambar 4. 40 Grafik nilai Error JST 10 lapisan tersembunyi

Perbandingan nilai error pada setiap jumlah lapisan sangat besar pada hanya pada JSt dengan 1 dan 2 lapisan, untuk lapisan 3 sampai 10 nilai error yang di dapatkan memiliki perbedaan yang sedikit. Dengan 10 lapisan tersembunyi

di dapatkan nilai error terkecil 1.4173, selanjutnya jaringan saraf tiruan dengan lapisan nilai error terkecil akan disimulasikan pada sistem untuk mengetahui respon terhadap kecepatan motor induksi

4.3 Hasil Simulasi dan Pengujian Respon

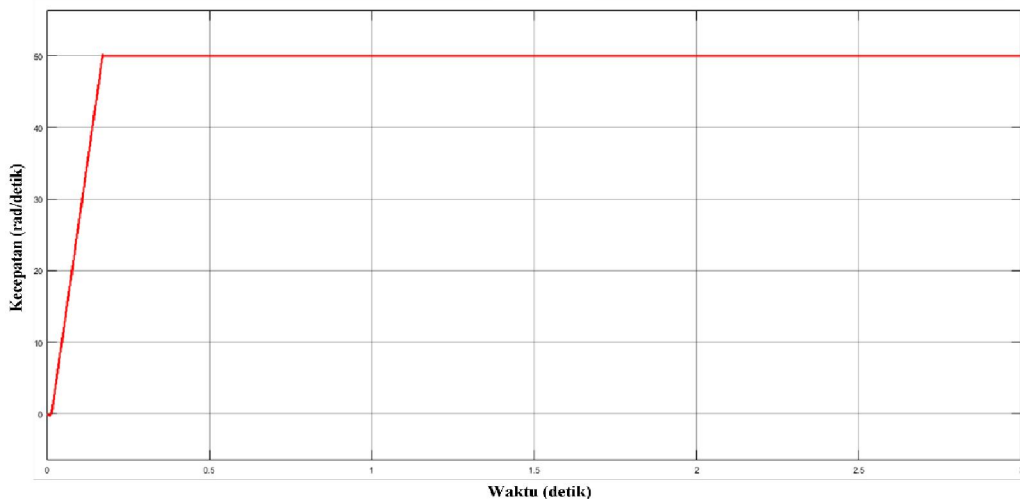
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi program pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan kontrol jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi, dengan mengubah kecepatan referensi motor induksi. Pengujian divariasikan menjadi 3 bagian yaitu kecepatan rendah 50 rad/detik, kecepatan menengah 100 rad/detik, kecepatan tinggi 140 rad/detik dan dibebani dengan 3 variasi, pembebanan torsi rendah sebesar 100 Nm, torsi menengah sebesar 500 Nm, torsi tinggi sebesar 900 Nm. Pengujian ini penting karena pada sistem seperti kapal dengan propulsi elektrik, kecepatan motor harus dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan.

4.3.1 Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan konstan dan beban 100 Nm

Pada simulasi kali ini, pengujian dilakukan dengan memberi beban konstan sebesar 100 Nm. Sedangkan kecepatan diatur bervariasi mulai dari 50 rad/detik sampai 140 rad/detik. pengujian dilakukan selama 3 detik. Respon sistem yang akan diamati ialah kesalahan (*error*), waktu naik (*rise time*), waktu tetap (*settling time*) dan overshoot. Torsi dari motor juga akan menjadi bahan pengamatan.

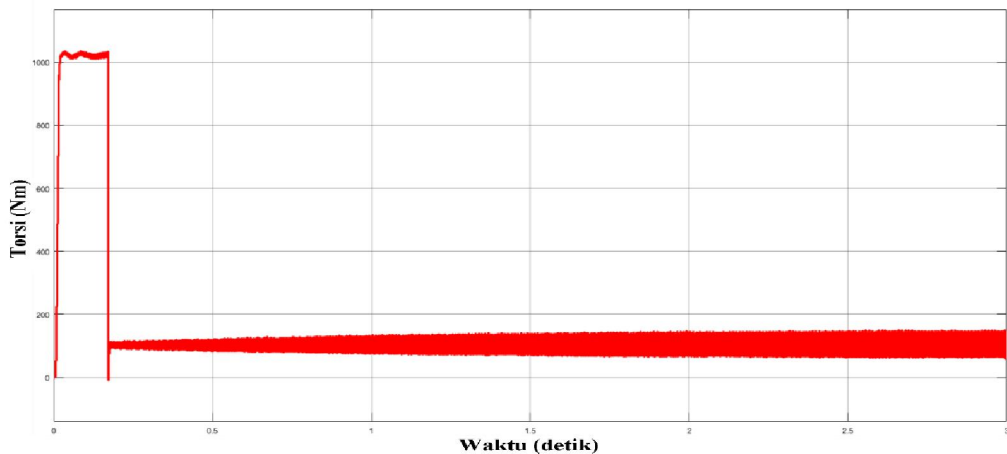
a. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 50 rad/detik dan beban 100 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 50 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 100 Nm.



Gambar 4. 41 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 100 Nm

Hasil respon sistem bahwa terjadi *overshoot* sebesar 0.148 dari nilai reverensi, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.169 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.172 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar **0.29 %**, sehingga kecepatan terukur 50.06 rad/sec.

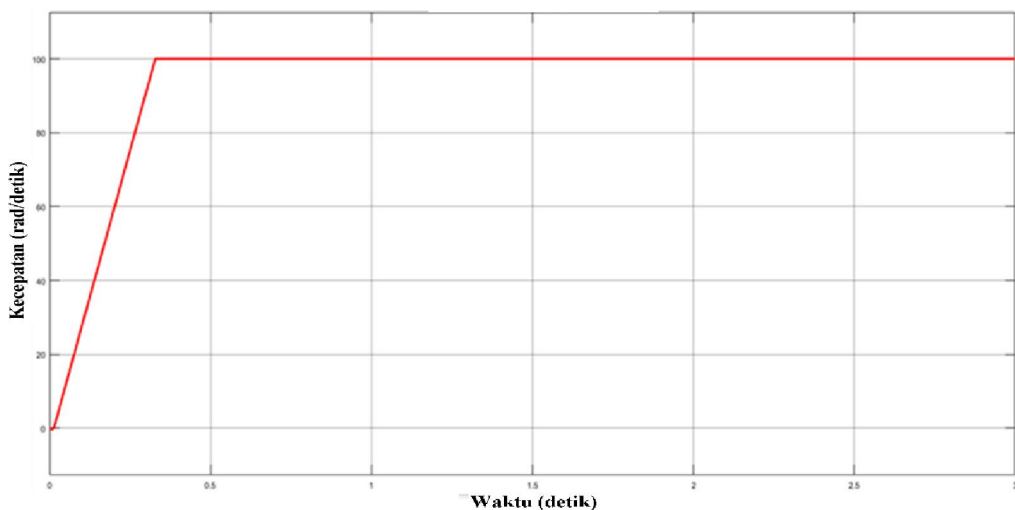


Gambar 4. 42 Torsi 100 Nm pada kecepatan 50 rad/detik

Pada saat start torsi hampir mencapai maksimum, kemudian terjadi penurunan selama bertahap mulai pada 0.17 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 100 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

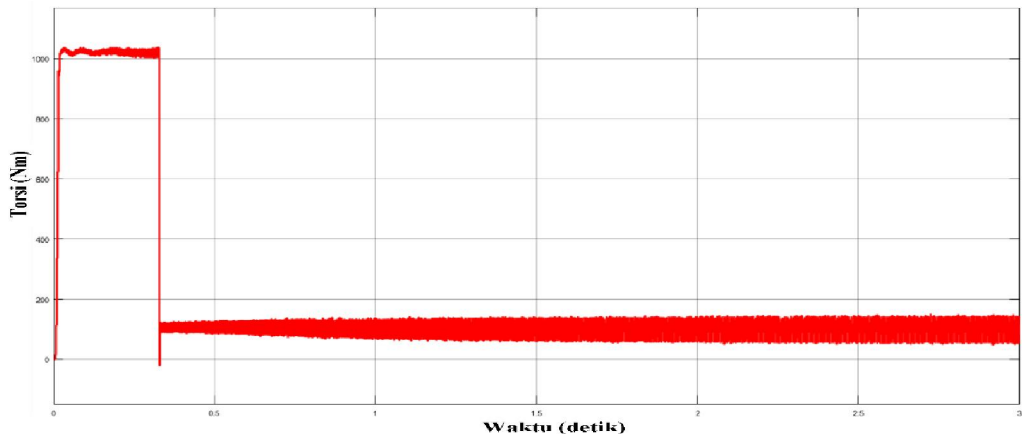
b. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 100 rad/detik dan beban 100 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 100 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 100 Nm



Gambar 4. 43 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 100 Nm

maka didapat respon sistem bahwa terjadi *overshoot* sebesar 0.065, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.326 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.327 detik sehingga terukur 100.1 rad/detik. Apabila nilai kesalahan ini dinyatakan dalam prosentase *steady-state error* maka nilainya sebesar **0.1%**

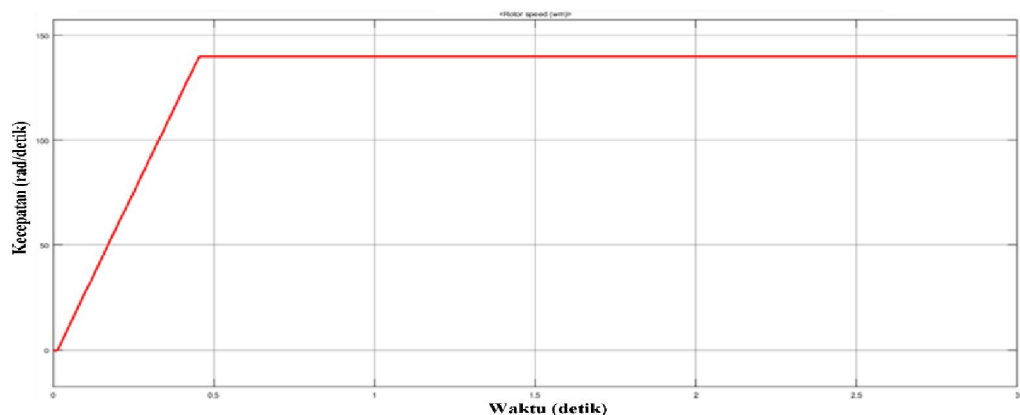


Gambar 4. 44 Torsi 100 Nm pada kecepatan 100 rad/detik

Pada saat awal start, torsi hampir mencapai maksimum yaitu kurang lebih 1000 Nm, kemudian mulai terjadi penurunan pada waktu 0.327 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil yaitu sekitar 100 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual bergerak mendekati kestabilan meskipun mengalami penurunan selama 0.0005 detik

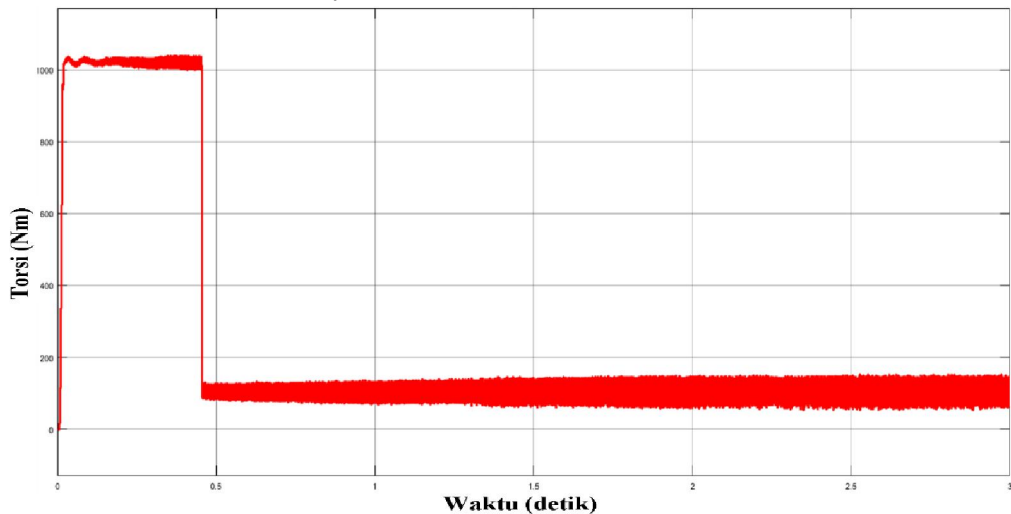
c. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 140 rad/detik dan beban 100 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 140 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 100 Nm.



Gambar 4. 45 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 100 Nm

Hasil respon sistem bahwa terjadi tanpa *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.454 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.456 detik serta memiliki nilai kesalahan sebesar 0.1 sehingga terukur kecepatan 140.1 rad/sec. Apabila nilai kesalahan ini dinyatakan dalam prosentase *steady-state error* maka nilainya sebesar 0.07 %

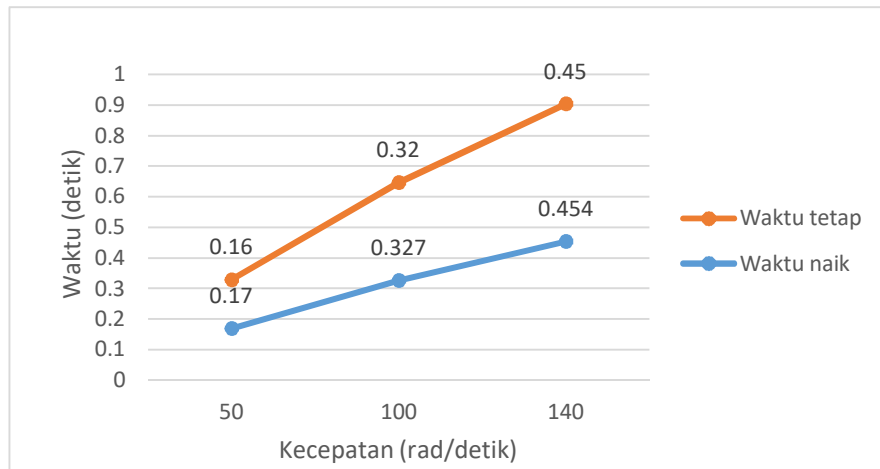


Gambar 4. 46 Torsi 100 Nm pada kecepatan 140 rad/detik

Pada saat awal start, torsi hampir mencapai maksimum yaitu kurang lebih 1000 Nm, kemudian mulai terjadi penurunan pada waktu 0.453 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil yaitu sekitar 100 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual bergerak mendekati kestabilan.

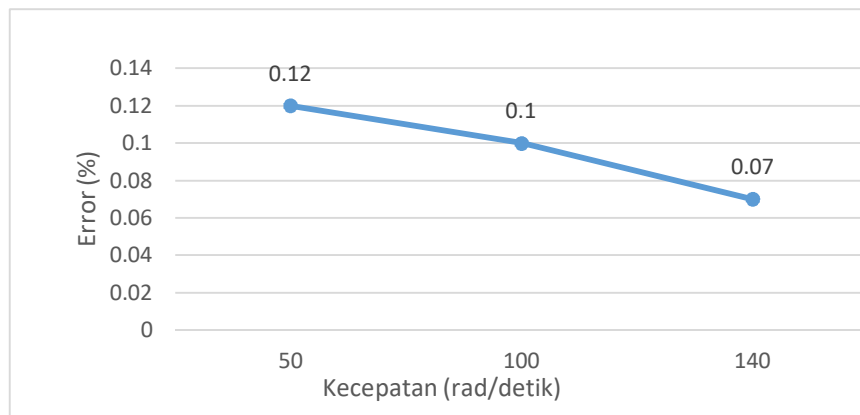
d. Hasil pengujian kecepatan 50 rad/detik sampai 140 rad/detik beban 100 Nm

Dari hasil pengujian yang dilakukan pada kecepatan 50 hingga 140 rad/detik dengan beban tetap 100 Nm, maka didapat hasil respon waktu seperti gambar 4.47, yang menyatakan hubungan antara kecepatan dengan respon waktu hasil pengontrolan. Terdapat dua parameter dari respon waktu yang diamati yaitu waktu naik (*Rise Time*) dan waktu tetap (*Settling Time*). Kedua respon waktu tersebut baik waktu naik maupun waktu tetap mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan kecepatan pada motor. Artinya semakin besar kecepatan yang bekerja pada motor induksi tiga fasa, maka waktu naik dan waktu tetapnya juga akan semakin bertambah. Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin



Gambar 4. 47 Kecepatan terhadap Respon waktu beban 100 Nm

besar kecepatan yang bekerja pada motor, maka pengendali berbasis jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi juga memerlukan waktu yang lebih besar agar nilai keluaran yang dihasilkan mendekati dengan nilai setpoint. Jeda waktu antara waktu naik dengan waktu tetap yang relatif sama yaitu kurang lebih sebesar 0.04 detik.



Gambar 4. 48 Grafik Kecepatan terhadap nilai error beban 100 Nm

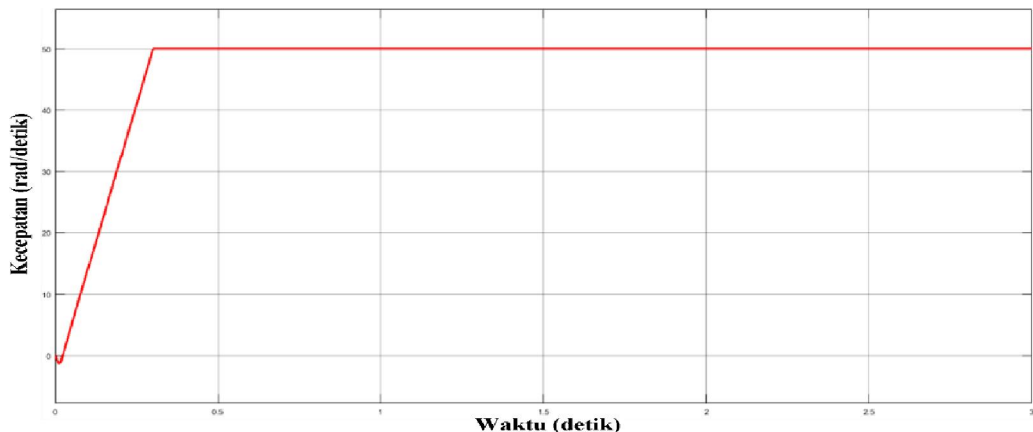
Dari grafik 4.48 dapat diamati mengenai hubungan antara kecepatan motor dengan nilai kesalahan (error). Pada pengujian dengan kecepatan sebesar 50 rad/detik memiliki nilai error 0.12%. Pada kecepatan 100 rad/detik memiliki error yang lebih besar 0.1%. Pada kecepatan 140 rad/detik memiliki error yang lebih besar 0.07% dari pengujian dihasilkan nilai kesalahan yang relatif sama pada masing-masing variasi kecepatan yaitu sebesar 0.1%. Sehingga dari data pengujian menunjukkan bahwa kecepatan tidak terlalu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap akurasi pengontrolan, selama beban torsi yang bekerja masih sama.

4.3.2 Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan konstan dan beban 500 Nm

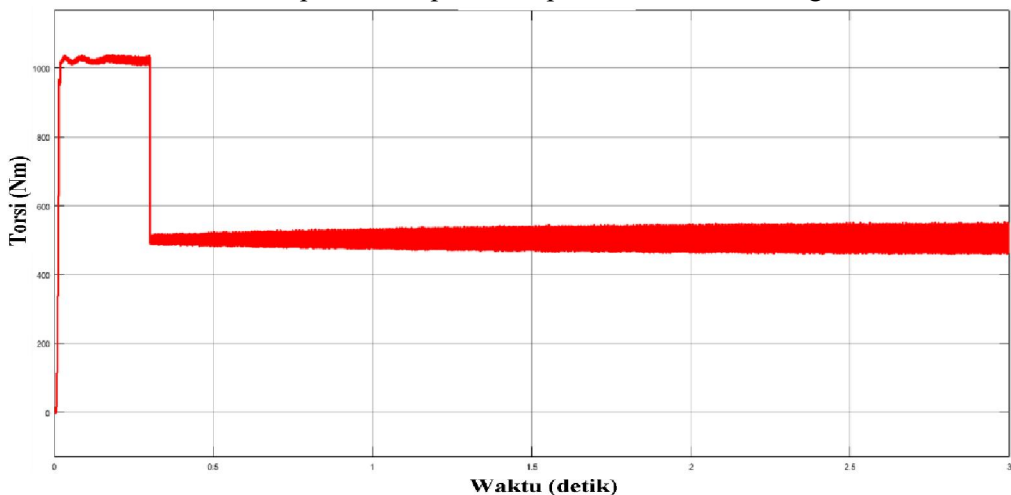
Pengujian dilakukan dengan memberi beban konstan sebesar 500 Nm. Sedangkan kecepatan diatur bervariasi mulai dari 50 rad/detik sampai 140 rad/detik. pengujian dilakukan selama 3 detik. Respon sistem yang akan diamati ialah kesalahan (*error*), waktu naik (*rise time*), waktu tetap (*settling time*) dan *overshoot*. Torsi dari motor juga akan menjadi bahan pengamatan.

a. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 50 rad/detik dan beban 500 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 50 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 500 Nm maka didapat respon sistem bahwa tanpa *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.230 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.31 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0.06 % .



Gambar 4. 49 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 500 Nm

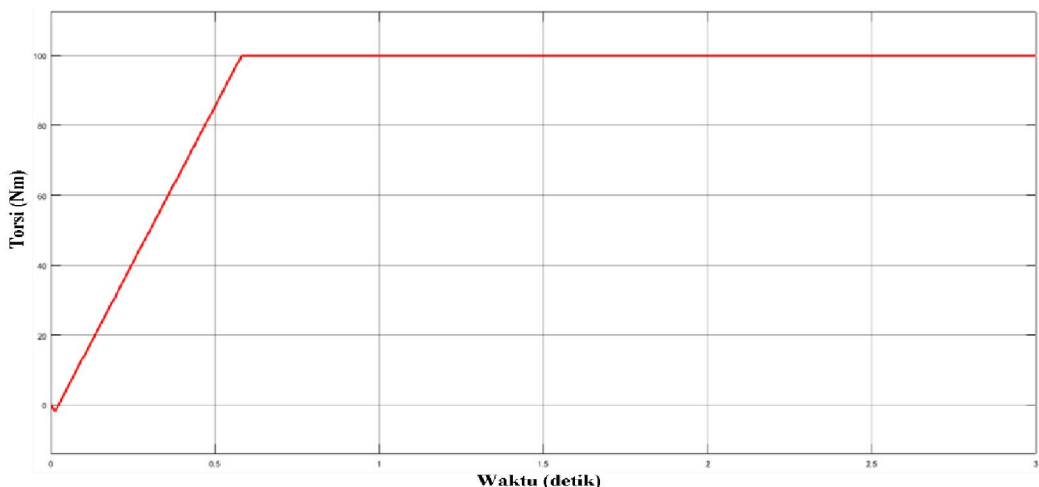


Gambar 4. 50 Torsi 500 Nm pada kecepatan 50 rad/detik

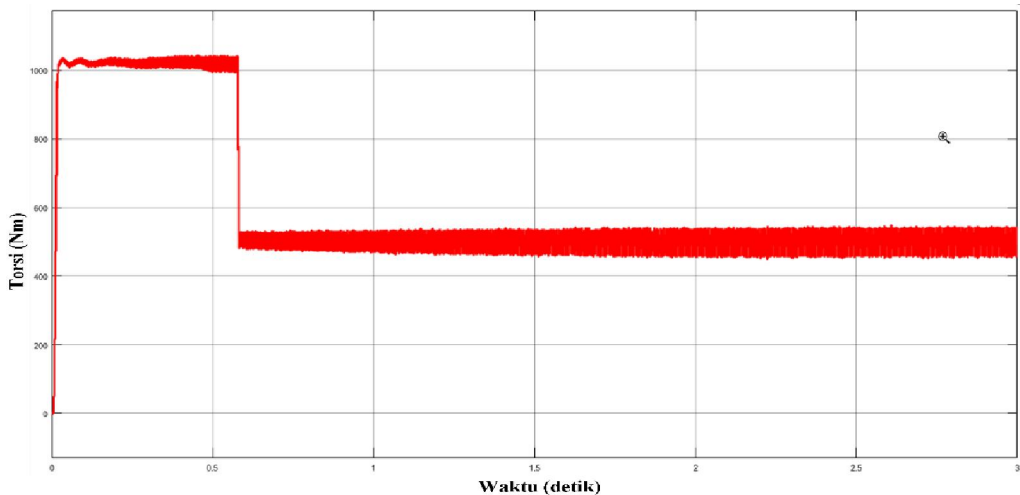
Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum gambar 4.50, kemudian terjadi penurunan selama bertahap sekitar pada 0.3 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 500 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

b. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 100 rad/detik dan beban 500 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 100 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 500 Nm maka didapat respon sistem bahwa tidak terjadi *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.578 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.59 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0 % .



Gambar 4. 51 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 500 Nm

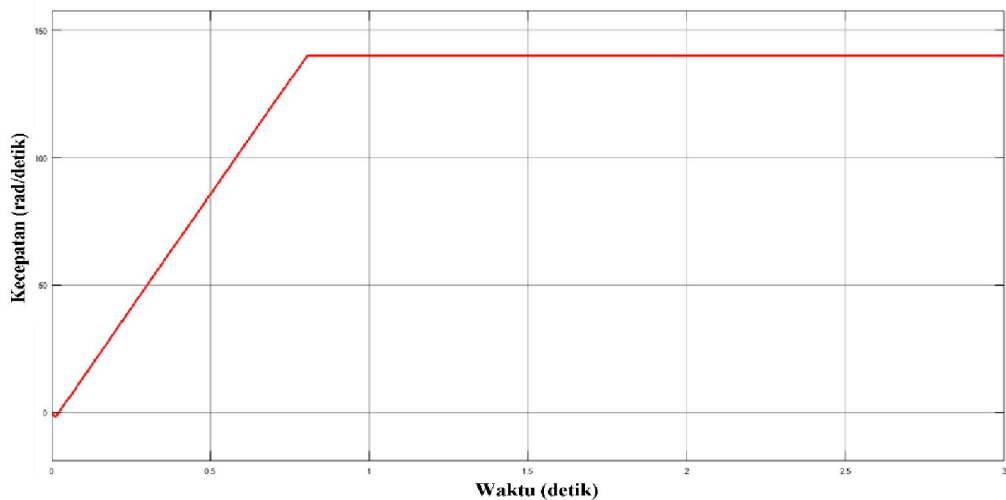


Gambar 4. 52 Torsi 500 Nm pada kecepatan 100 rad/detik

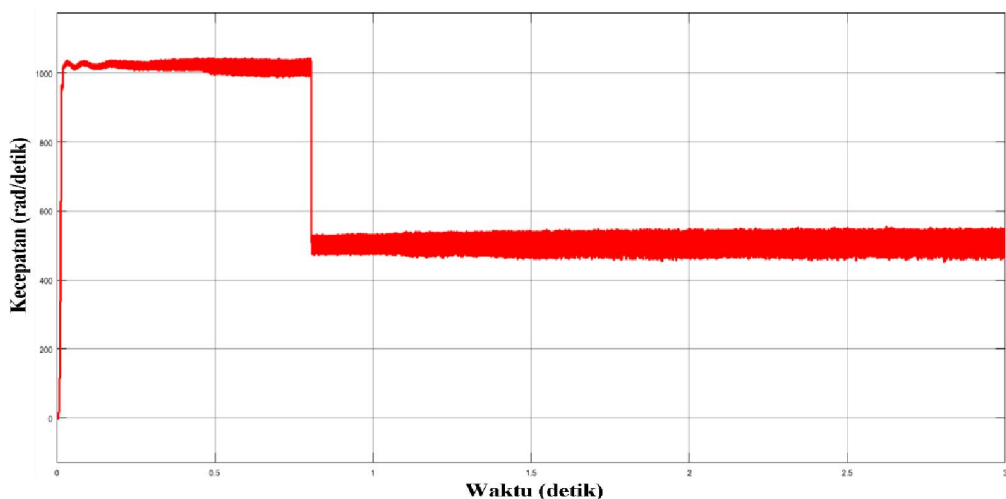
Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum gambar 4.52, kemudian terjadi penurunan selama bertahap mulai pada 0.58 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 500 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

c. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 140 rad/detik dan beban 500 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 100 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 500 Nm maka didapat respon sistem bahwa tidak terjadi *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 0.804 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 0.85 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0. %



Gambar 4.38 Respon waktu pada kecepatan 140 rad/detik dengan torsi 500 Nm

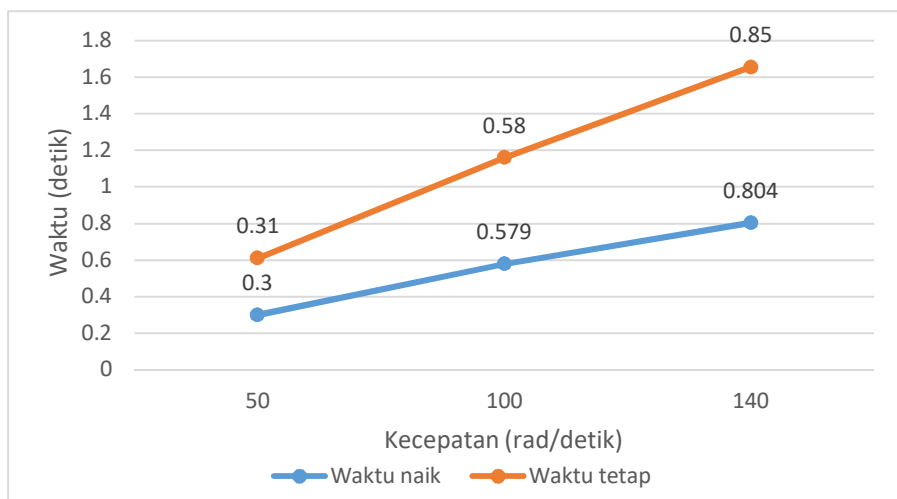


Gambar 4. 53 Torsi 500 Nm pada kecepatan 140 rad/detik

Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum gambar 4.53, kemudian terjadi penurunan selama bertahap mulai pada 0.804 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 500 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

d. Hasil pengujian kecepatan 50 rad/detik sampai 140 rad/detik beban 500 Nm

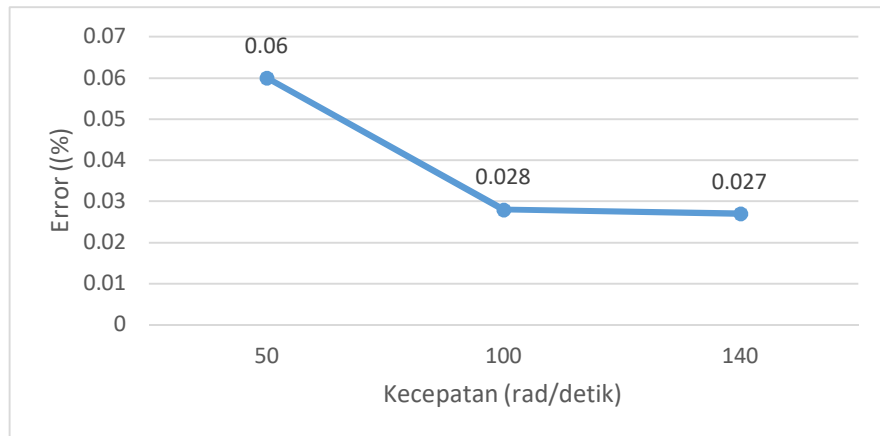
Dari hasil pengujian yang dilakukan pada kecepatan 50 hingga 140 rad/detik dengan beban tetap 500 Nm, maka didapat hasil respon waktu seperti gambar 4.54, yang menyatakan hubungan antara kecepatan dengan respon waktu hasil pengontrolan. Terdapat dua parameter dari respon waktu yang diamati yaitu waktu naik (*Rise Time*) dan waktu tetap (*Settling Time*)..



Gambar 4. 54 Kecepatan terhadap respon beban 500 Nm

Kedua respon waktu tersebut baik waktu naik maupun waktu tetap mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan kecepatan pada motor gambar 4.54. Artinya semakin besar kecepatan yang bekerja pada motor induksi tiga fasa, maka waktu naik dan waktu tetapnya juga akan semakin bertambah. Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin besar kecepatan yang bekerja pada motor, maka pengendali berbasis jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi juga memerlukan waktu yang lebih besar agar nilai keluaran yang dihasilkan mendekati dengan nilai setpoint. Jeda waktu antara waktu naik dengan waktu tetap yang relatif sama yaitu kurang lebih sebesar 0.04 detik

Kemudian grafik 4.4 dapat diamati mengenai hubungan antara kecepatan motor dengan nilai kesalahan (error). Pada pengujian dengan kecepatan sebesar 50 rad/detik sampai 140 rad/detik dengan torsi 100 Nm dihasilkan error kecepatan sangat kecil sebesar 0.04, nilai kesalahan yang relatif sama pada masing-masing varias.



Gambar 4. 55 Kecepatan terhadap nilai error beban 500 Nm

Dari grafik 4.55 dapat diamati mengenai hubungan antara kecepatan motor dengan nilai kesalahan (error). Pada pengujian dengan kecepatan sebesar 50 rad/detik memiliki nilai error 0.06%. Pada kecepatan 100 rad/detik memiliki error yang lebih besar 0.028%. Pada kecepatan 140 rad/detik memiliki error yang lebih besar 0.027% dari pengujian dihasilkan nilai kesalahan yang relatif sama pada masing-masing variasi kecepatan yaitu sebesar 0.1%. Sehingga dari data pengujian menunjukkan bahwa kecepatan tidak terlalu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap akurasi pengontrolan, selama beban torsi yang bekerja masih sama

4.3.3 Simulasi dan Pengujian pada variasi kecepatan konstan dan beban 900 Nm

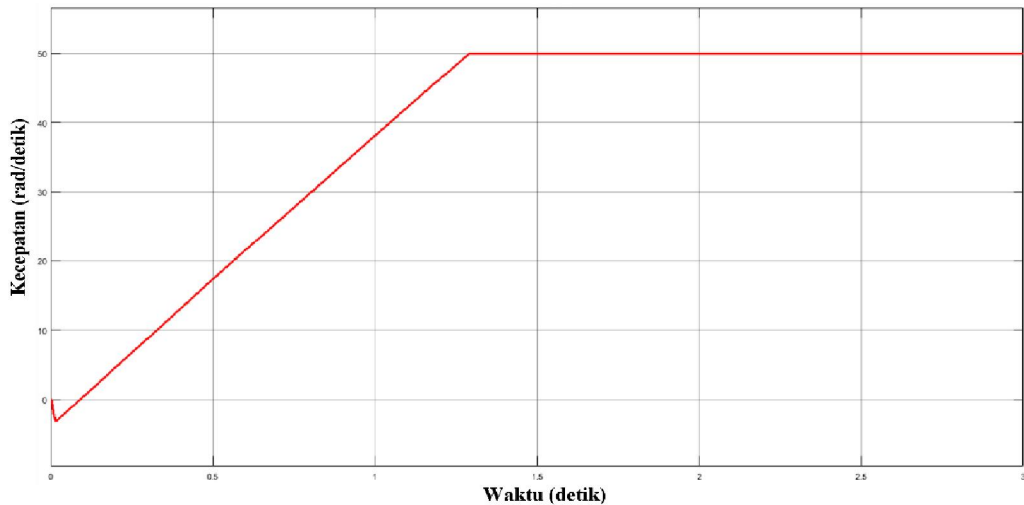
Pengujian dilakukan dengan memberi beban konstan sebesar 900 Nm. Sedangkan kecepatan diatur bervariasi mulai dari 50 rad/detik sampai 140 rad/detik. Pengujian dilakukan selama 5 detik. Respon sistem yang akan diamati ialah kesalahan (*error*), waktu naik (*rise time*), waktu tetap (*settling time*) dan *overshoot*. Torsi dari motor juga akan menjadi bahan pengamatan.

a. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 50 rad/detik dan beban 900 Nm

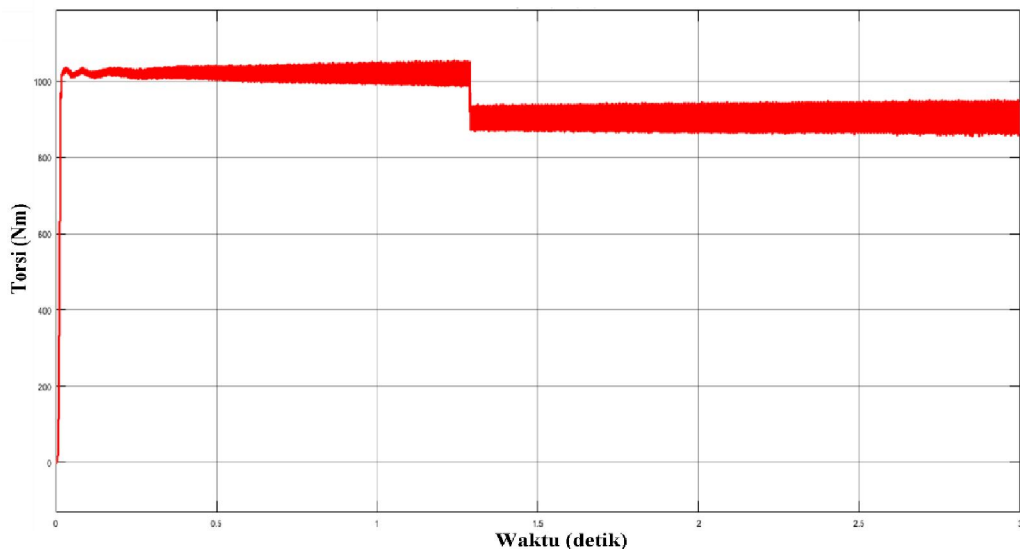
Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 5 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 50 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 500 Nm maka didapat respon sistem bahwa tidak terjadi *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 1.29 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 1.294 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0.02 %, sehingga kecepatan terbaca 49.99 rad/sec.

Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum (gambar 4.57), kemudian terjadi penurunan selama bertahap mulai pada 1.28 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 900 Nm sesuai dengan beban yang

diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.



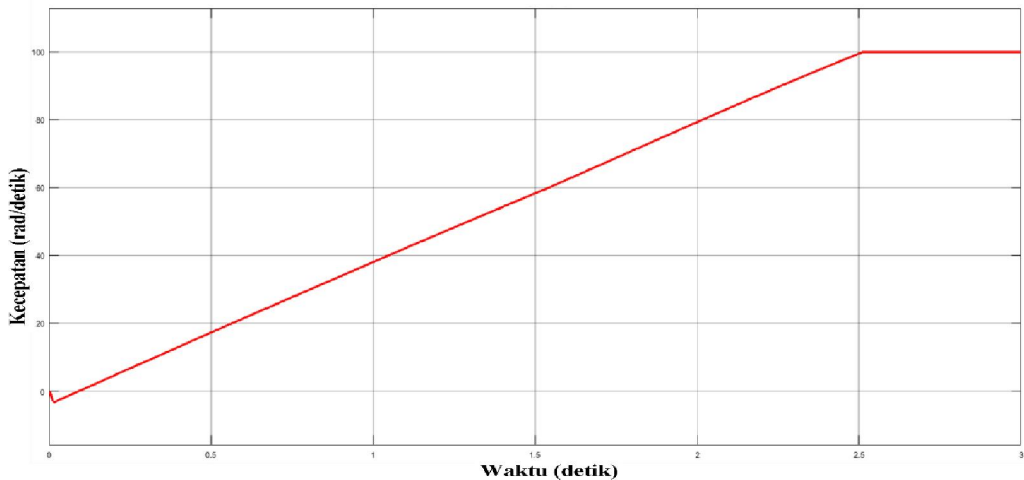
Gambar 4. 56 Respon waktu pada kecepatan 50 rad/detik dengan torsi 900 Nm



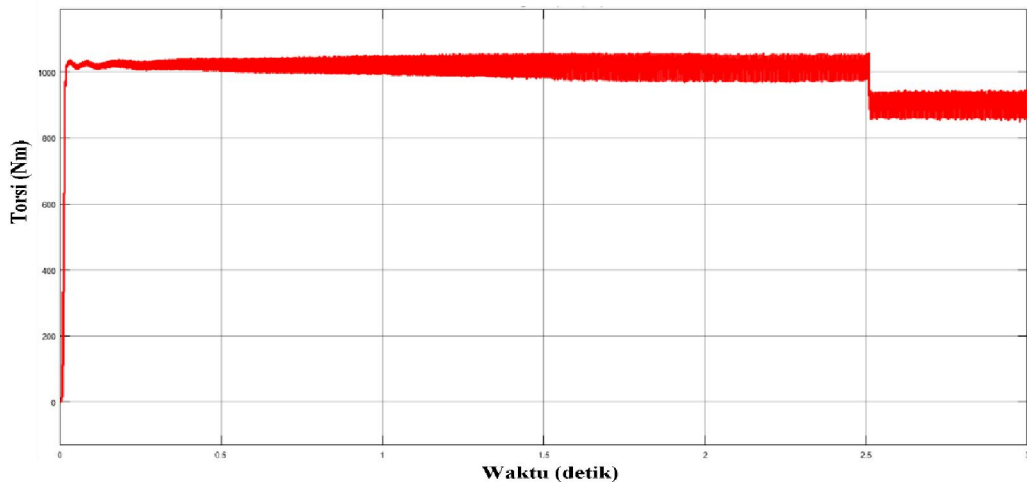
Gambar 4. 57 Torsi 900 Nm pada kecepatan 50 rad/detik

b. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 100 rad/detik dan beban 900 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 3 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 100 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 900 Nm maka didapat respon sistem bahwa tidak terjadi *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 2.51 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 2.52 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0.01% sehingga terbaca 99.99 Nm.



Gambar 4. 58 Respon waktu pada kecepatan 100 rad/detik dengan torsi 900 Nm

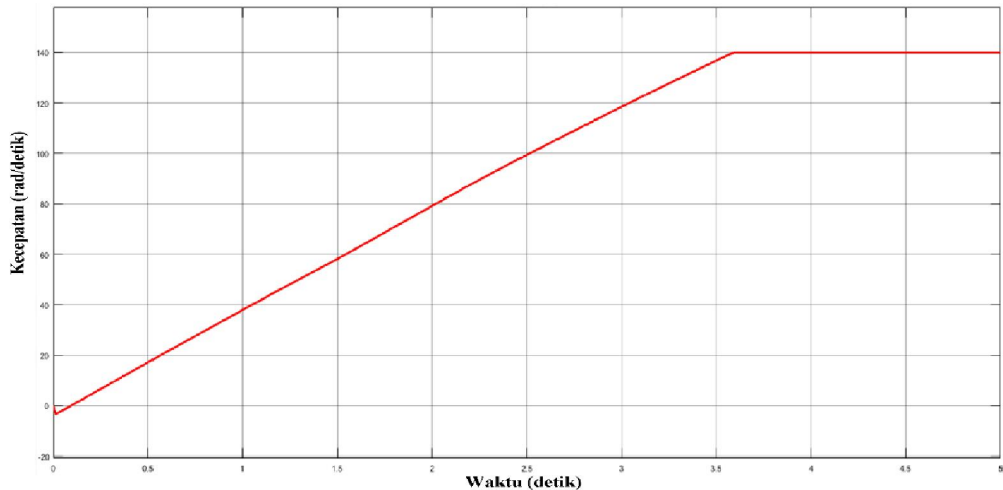


Gambar 4. 59 Torsi 900 Nm pada kecepatan 100 rad/detik

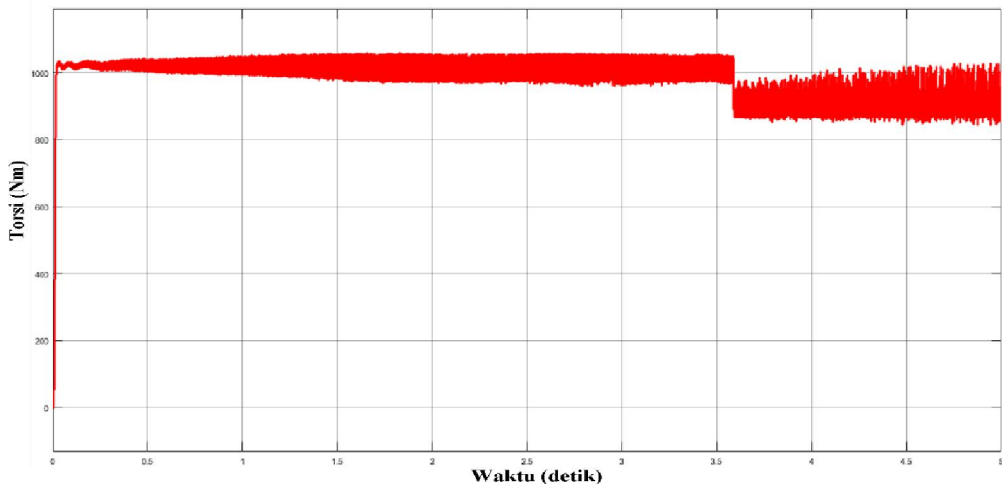
Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum gambar 4.59, kemudian terjadi penurunan selama bertahap mulai pada 0.251 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 900 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

c. Hasil pengujian pada kecepatan konstan 140 rad/detik dan beban 900 Nm

Dari hasil simulasi yang dilakukan selama 5 detik, dimana kecepatan referensi yang digunakan sebesar 140 rad/detik dan dengan torsi beban sebesar 900 Nm maka didapat respon sistem bahwa tidak terjadi *overshoot*, waktu naik yang diperlukan sebesar T_r 3.59 detik, dengan waktu tetap sebesar T_s 3.6 detik serta *steady-state error* yang terjadi sebesar 0 % .



Gambar 4. 60 Respon waktu pada kecepatan 140 rad/detik dengan torsi 900 Nm



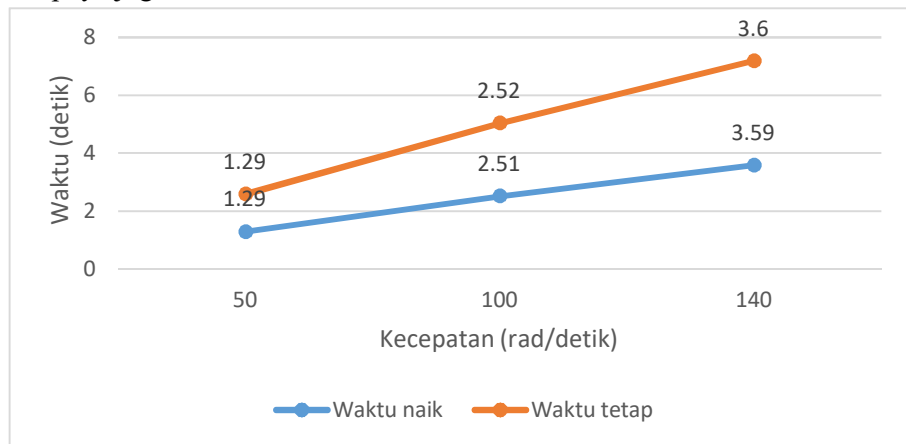
Gambar 4. 61 Torsi 900 Nm pada kecepatan 140 rad/detik

Pada saat start, torsi hampir mencapai maksimum gambar 4.61, kemudian terjadi mulai pada 3.59 detik hingga nilai akhirnya mencapai stabil sekitar 900 Nm sesuai dengan beban yang diberikan. Penurunan torsi seiring dengan kecepatan aktual mendekati kestabilan.

d. Pengujian kecepatan 50 rad/detik sampai 140 rad/detik beban 900 Nm

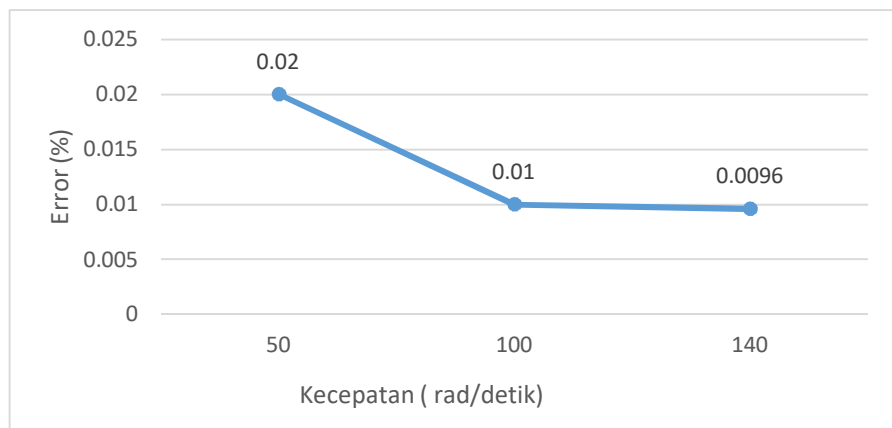
Dari hasil pengujian yang dilakukan pada kecepatan 50 hingga 140 rad/detik dengan beban tetap 900 Nm, maka didapat hasil respon waktu seperti gambar 4.62 yang menyatakan hubungan antara kecepatan dengan respon waktu hasil pengontrolan. Terdapat dua parameter dari respon waktu yang diamati yaitu waktu naik (*Rise Time*) dan waktu tetap (*Settling Time*). Kedua respon waktu tersebut baik waktu naik maupun waktu tetap mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan kecepatan pada motor. Artinya semakin besar kecepatan

yang bekerja pada motor induksi tiga fasa, maka waktu naik dan waktu tetapnya juga akan semakin bertambah.



Gambar 4. 62 Kecepatan terhadap respon beban 900 Nm

Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin besar kecepatan yang bekerja pada motor, maka pengendali berbasis jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi juga memerlukan waktu yang lebih besar agar nilai keluaran yang dihasilkan mendekati dengan nilai setpoint. Jeda waktu antara waktu naik dengan waktu tetap yang relatif sama yaitu kurang lebih sebesar 0.03 detik.



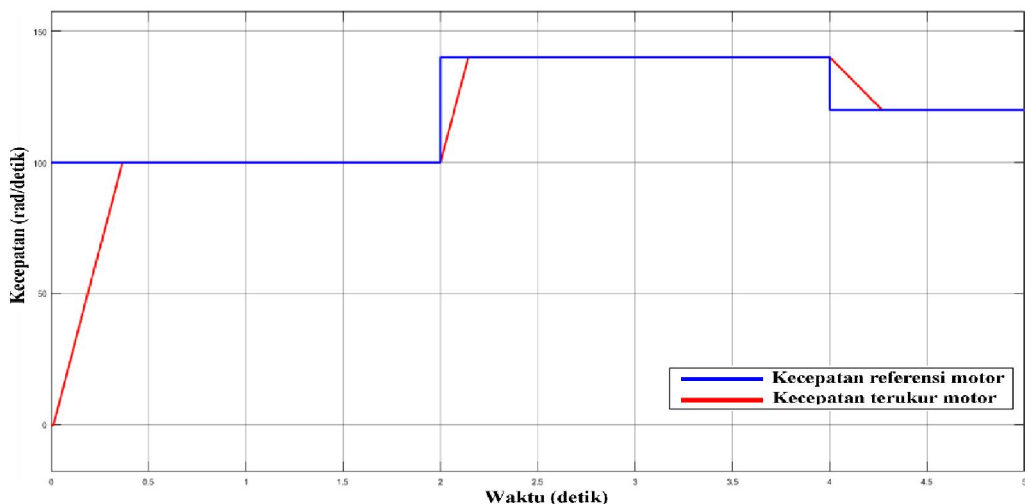
Gambar 4. 63 Grafik Kecepatan motor terhadap nilai error

Dari gambar 4.63 dapat diamati mengenai hubungan antara kecepatan motor dengan nilai kesalahan (error). Pada pengujian dengan kecepatan sebesar 50 rad/detik dan torsi 900 Nm dihasilkan error kecepatan sebesar 0.02%. nilai error ini merupakan nilai yang terbesar dari pengujian yang dilakukan. Pada kecepatan 140 rad/sec tidak dihasilkan nilai error, sehingga dari data pengujian menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kecepatan maka

semakin kecil nilai error, hal tersebut dikarenakan motor mendekati nilai kecepatan tertinggi nya

4.3.1 Simulasi dan Pengujian pada kecepatan reverensi bervariasi

Pada kondisi awal simulasi, kecepatan referensi yang diberikan sebesar 100 rad/detik. Selanjutnya, kecepatan referensi dinaikkan menjadi 150 rad/detik setelah mencapai detik 5. Setelah diuji dengan kenaikan kecepatan referensi, kontrol jaringan saraf tiruan 10 lapisan tersembunyi diuji dengan penurunan kecepatan referensi. Pada detik 4, kecepatan referensi diturunkan sebesar 300 rad/detik menjadi 120 rad/detik. Torsi beban yang diberikan pada simulasi ini adalah konstan, yaitu sebesar 200 Nm



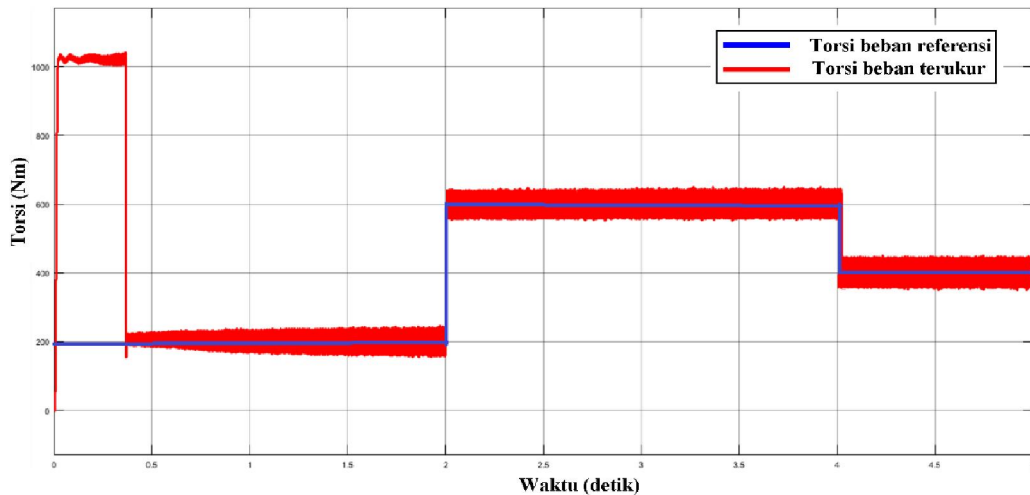
Gambar 4. 64 Hasil simulasi kecepatan referensi bervariasi

Hasil dari simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 4.64. Garis berwarna biru merupakan nilai referensi kecepatan yang diberikan pada pengendali, sedangkan garis berwarna merah merupakan kecepatan sesungguhnya dari motor induksi yang terukur. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diamati bahwa kecepatan yang terukur dari motor mampu mengikuti kecepatan referensi yang diberikan, dengan tingkat ketepatan yang tinggi. Hasil ini membuktikan bahwa pengendali berbasis jaringan saraf tiruan dapat mengendalikan kecepatan motor induksi dengan tingkat ketepatan mencapai 100%.

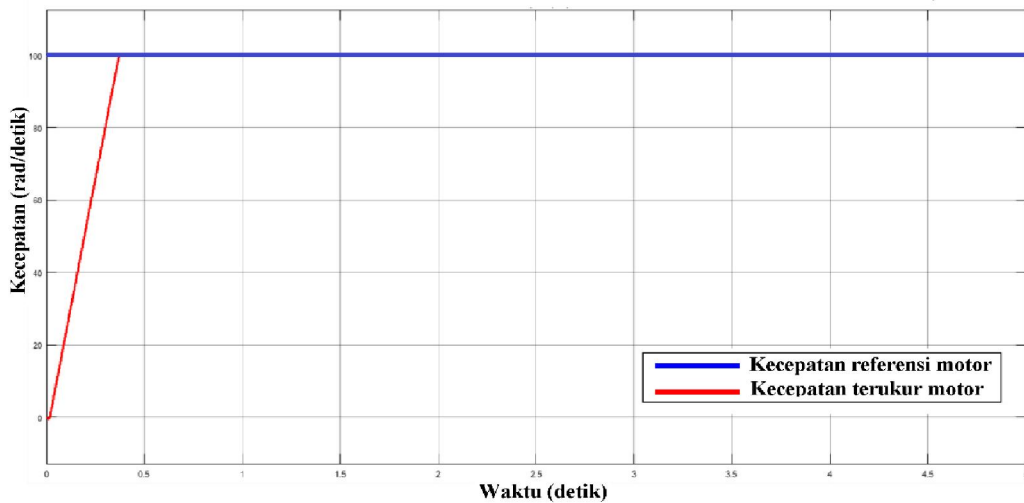
4.3.2 Pengujian kecepatan referensi konstan dan torsi beban bervariasi

Pengujian dilakukan dengan memberikan kecepatan referensi yang konstan pada motor, yaitu sebesar 100 rad/detik, sedangkan torsi beban divariasikan. Pada kondisi awal, torsi beban diberikan sebesar 200 Nm. Pada detik 2, torsi beban

dinaikkan menjadi 600 Nm. Selanjutnya torsi beban diturunkan menjadi 400 Nm pada detik 4.



(a)



(b)

Gambar 4. 65 Hasil simulasi motor Induksi dengan kecepatan referens konstan dan torsi beban bervariasi (a) Torsi (b) Kecepatan

Hasil simulasi ditunjukkan pada Pada Gambar 4.47 (a), diperlihatkan grafik perbandingan antara nilai torsi referensi yang diberikan terhadap nilai torsi yang terukur. Nilai torsi referensi ditunjukkan oleh garis berwarna biru, sedangkan nilai torsi yang terukur ditunjukkan oleh garis berwarna merah. Dari grafik tersebut, dapat diamati bahwa nilai torsi yang terukur dapat mengikuti torsi referensi yang diberikan. Pada Gambar 65(b), ditunjukkan perbandingan nilai kecepatan referensi motor dan kecepatan yang terukur dari motor. Kecepatan

referensi motor yang ditunjukkan oleh garis berwarna biru dibuat bernilai konstan, yaitu 100 rad/detik. Hasil kecepatan motor yang terukur ditunjukkan oleh garis berwarna merah, dimana kecepatan yang terukur mendekati kecepatan referensi yang diberikan dengan ketepatan tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengendali berbasis jaringan saraf tiruan memiliki tingkat ketepatan yang baik dalam mengatur kecepatan motor agar tetap konstan walaupun terjadi perubahan beban.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan pengujian yang dilakukan menggunakan Matlab serta analisa dari data yang didapat, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut ini :

- a) Pelatihan jaringan saraf tiruan dengan variasi 1-10 lapisan tersembunyi (*hidden layer*) menghasilkan error terkecil 1.417 pada jaringan saraf tiruan dengan 10 lapisan tersembunyi (*hidden layer*)
- b) Pengujian pembebanan 100Nm dengan kecepatan konstan 50, 100 dan 140 rad/detik, diperoleh rata-rata nilai *steady-state error* 0.12%, dan overshoot terjadi hanya pada kecepatan 50rad/detik sebesar 0.0074%. Pengujian simulasi pembebanan 500Nm dengan kecepatan konstan 50, 100 dan 140 rad/detik, diperoleh rata-rata nilai *steady-state error* 0.038%. Pengujian simulasi pembebanan 900Nm dengan kecepatan konstan 50, 100 dan 140 rad/detik, diperoleh rata-rata nilai *steady-state error* 0.0132%, tanpa *overshoot*
- c) Pengujian pembebanan 100Nm dengan kecepatan konstan 50, 100 dan 140 rad/detik, diperoleh rata-rata waktu naik 0.31detik, waktu tetap 0.319 detik. Pengujian simulasi pembebanan 500Nm dengan kecepatan konstan 50, 100 dan 140 rad/detik, diperoleh rata-rata waktu naik 0.561detik, waktu tetap 0.58 detik. Pengujian simulasi pembebanan 900Nm dengan kecepatan konstan 50 rad/detik diperoleh waktu naik 1.27 detik, waktu tetap 1.29 detik. Kecepatan 100rad/detik waktu naik 2.51 detik, waktu tetap 1.52 detik. Kecepatan 140rad/detik waktu naik 3.59 detik, waktu tetap 3.6 detik.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat dirumuskan untuk penelitian selanjutnya ialah sebagai berikut ini :

- a) Pada penelitian ini menggunakan teknik simulasi, maka pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan daya motor yang berbeda dan dengan metode pelatihan jaringan saraf tiruan lainnya
- b) Dapat dilakukan perbandingan menggunakan jenis kontrol lainnya sebagai acuan untuk menilai bagaimana unjuk kerja dari pengendali jaringan saraf tiruan ini.

“Halaman ini Sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1.] Zuhail dan Zhanggischian, 2004. “ *Prinsip Dasar Elektroteknik* ”. PT Gramedia. Jakarta.
- [2.] N. Mohan, Advanced Electric Drives: *Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*, John Wiley & Sons, 2014.
- [3.] Hall, Dennis T. “ *Pengetahuan Praktis Kelistrikan Kapal* ”. Diterjemahkan oleh Sarwito S. Jakarta :Wetherby Seamanship International.
- [4.] Kurniawan, Adi 2015. *Strategi Kendali Kecepatan Motor Induksi menggunakan PWM Inverter Berbasis Jaring Saraf Tiruan*. Teknik Sistem Perkapalan ITS, Surabaya
- [5.] Afandy, Luqman H. 2016. “ *Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Multi Penggerak dengan Sumber Inverter Pada Mobil Listrik Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan* ”. Jurnal Teknik Elektro. Universitas Jember.
- [6.] Staperman Douwe and Klien Hans. “ *Design of Propulsion and Electrical Power Generation System* ” London. EC2R 5BJ
- [7.] Anang, Ali 2016. “*Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Teknik Artificial Intelligent Berbasis Vektor Kontrol*”. Politeknik Elektronika Surabaya.
- [8.] Purwanto, Era 2011. *Pengembangan Model Motor Induksi sebagai Penggerak Mobil Listrik dengan Menggunakan Metode Vektor Kontrol*, Jurnal Ilmiah Elite Elektro Vol. II no. 02, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya
- [9.] Purnata,Hendi 2017. “*Perancangan Inverter Tiga Fasa Menggunakan Metode Hysteresis Space Vector Pulse dengan Modulasi untuk Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa*” Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [10.] Hermawan Arief, 2006. “ *Jaringan Saraf Tiruan Teori dan Aplikasi* ” Yogyakarta, CV Andi Offset
- [11.] Puspitaningrum Diyah, 2006. “*Pengantar Jaringan Saraf Tiruan*” Yogyakarta, CV Andi Offset
- [12.] Siang JJ. (2005). “*Jaringan Syaraf Tiruan dan pemrogramannya menggunakan MATLAB*.” Andi, Yogyakarta.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS

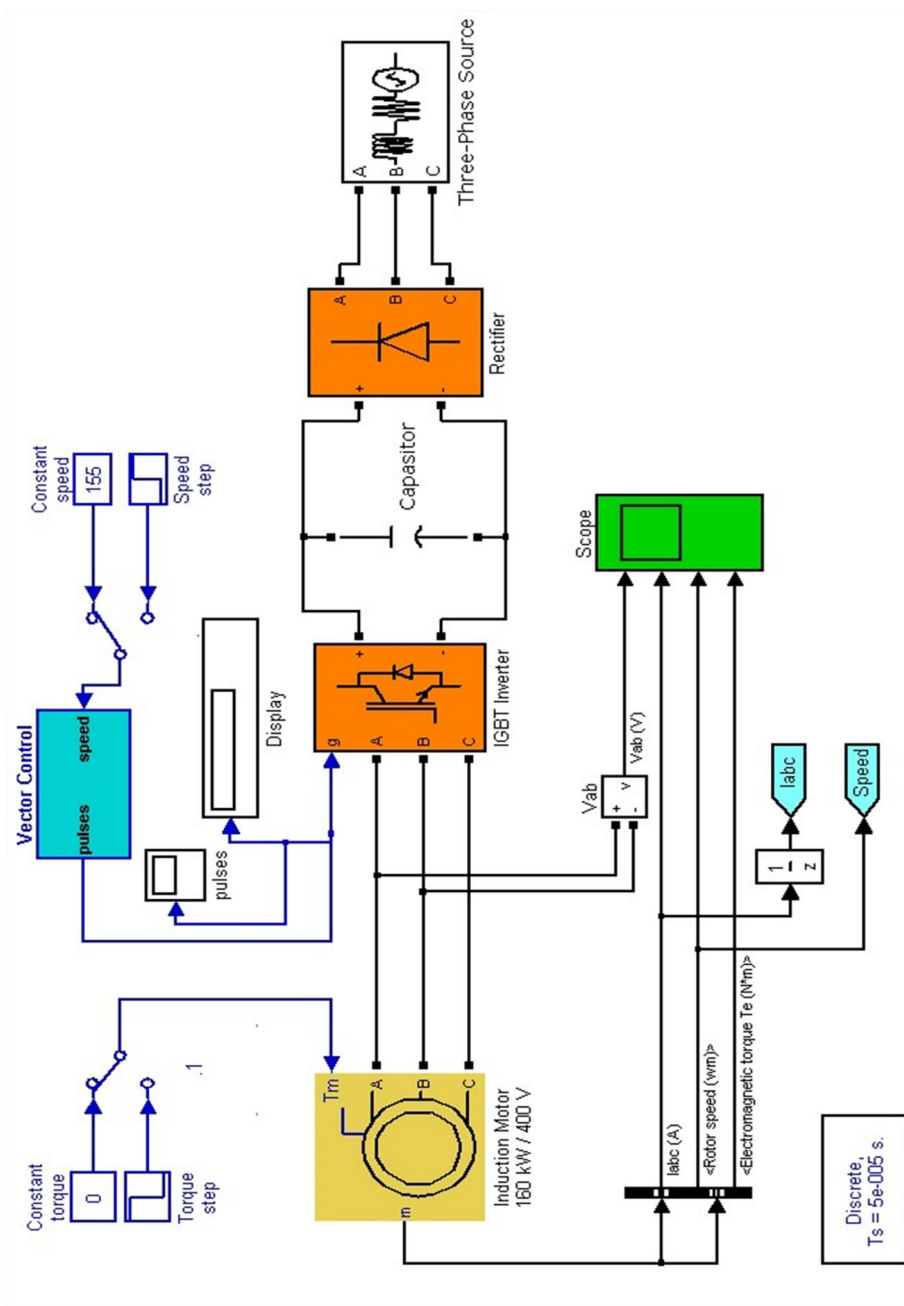


Penulis dilahirkan di Gresik, 20 Juli 1993, Penulis telah menempuh pendidikan formal mulai dari MI-Almuniroh 01 Pangkah Watan, SMPN 01 Sidayu, SMAN 1 Sidayu dan Diploma 3 Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis diterima melalui Lintas jalur 2015 pada jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Kota Surabaya dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan nomor registrasi pokok (NRP) 4215105003 dan terdaftar sebagai keluarga angkatan 2015 di jurusan

Di Departemen Teknik Sistem Perkapalan ini, penulis mengambil bidang studi *Marine Electrical and Automation System* (MEAS). Selama menempuh kuliah, penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Kegiatan akademik meliputi kegiatan perkuliahan dari semester pertama hingga semester akhir. Selain itu penulis juga aktif menjadi anggota Grader di Laboratorium Kelistrikan Kapal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 2

